Hermes Manoel Galvão Castelo Branco

**Modelagem Multiobjetivo para o Problema da Alocação
de Monitores de Qualidade da Energia em Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências - Programa de
Engenharia Elétrica

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

São Carlos
2013

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.

B816m Branco, Hermes Manoel Galvão Castelo
Modelagem multiobjetivo para o problema da alocação de monitores de qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica / Hermes Manoel Galvão Castelo Branco; orientador Mário Oleskovicz. São Carlos, 2013.

Tese (Doutorado) - 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, 2013.

1. Sistemas de distribuição. 2. Sistemas elétricos de potência. 3. Qualidade da energia elétrica. 4. Alocação de monitores. 5. Otimização multiobjetivo. 6. Algoritmos evolutivos multiobjetivo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **HERMES MANOEL GALVÃO CASTELO BRANCO**.

Título da tese: "Modelagem multiobjetivo para o problema da alocação de monitores de qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica".

Data da defesa: 30/07/2013

Comissão Julgadora:**Resultado:**

Prof. Dr. **Mário Oleskovicz (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Alexandre Cláudio Botazzo Delbem**
(Instituto de Matemática e Computação/ICMC)

APROVADO

Prof. Dr. **Carlos Augusto Duque**
(Universidade Federal de Juiz de Fora/UFJF)

APROVADO

Prof. Dr. **Jorge Coelho**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Aprovado

Prof. Dr. **Benemar Alencar de Souza**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Sumário

Resumo	xv
Abstract	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivo	6
1.3 Contribuição do Trabalho	7
1.4 Considerações Finais e Organização do Documento	7
2 Estado da Arte na Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica	9
2.1 Conceitos Básicos Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica	10
2.1.1 Método das posições de falta	14
2.2 Trabalhos Relacionados ao Tema Proposto	16
2.3 Considerações Finais	25
3 Otimização Multiobjetivo e Algoritmos Aplicados	27
3.1 Otimização Multiobjetivo: Aspectos Conceituais	27
3.2 Algoritmos Evolutivos e a Otimização Multiobjetivo	30
3.3 Algoritmos Genéticos	33
3.4 <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i>	34
3.5 Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com Tabelas - AEMT	36
3.6 Considerações Finais	38
4 Modelagem Proposta para Alocação de Monitores de QEE em Sistemas de Distribui-	

ção de Energia	39
4.1 Representação Computacional dos Sistemas de Distribuição	39
4.2 Aspectos Considerados para a Alocação de Monitores de QEE	42
4.2.1 Aspectos relacionados à topologia do sistema	42
4.2.2 Aspectos relacionados aos afundamentos de tensão	45
4.3 Modelo de Otimização Multiobjetivo Proposto para Alocação de Monitores de QEE em SDs	46
4.3.1 Vetor de existência	46
4.3.2 O custo do monitoramento de um SD	47
4.3.3 O monitoramento das cargas em um SD	47
4.3.4 Área monitorada a partir de um ramal c_{ij}	47
4.3.5 A ambiguidade topológica de um SD	48
4.3.6 Cobertura dos afundamentos de tensão	49
4.3.7 Redundância no monitoramento dos afundamentos de tensão	52
4.3.8 Função objetivo do problema de otimização proposto	52
4.4 Aplicação do Algoritmo AEMT ao Problema Proposto	53
4.5 Considerações Finais	58
5 Sistemas Elétricos Utilizados	59
5.1 O Software <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	59
5.2 Sistemas de Distribuição Analisados	60
5.2.1 Circuito alimentador IEEE de 13 barras	60
5.2.2 Circuito alimentador IEEE de 37 barras	69
5.2.3 Circuito alimentador IEEE de 34 barras	74
5.3 Considerações Finais	79
6 Resultados Obtidos	81
6.1 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 13 barras	81
6.1.1 Cenário 1	82
6.1.2 Cenário 2	85
6.1.3 Cenário 3	88
6.2 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 37 barras	89
6.3 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 34 barras	94
6.4 Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura Correlata	96
6.5 Considerações Finais	101
7 Conclusões e Continuidade da Pesquisa	103

7.1 Continuidade da Pesquisa	105
Referências Bibliográficas	107

Dedicatória

*Aos meus pais, Hermes e Margarida, e
à minha noiva Nayra, por todo o amor e
carinho que têm por mim.*

Agradecimentos

Aos meus pais, Hermes e Margarida, pelo amor, paciência, incentivo, apoio e esforço.

À minha noiva Nayra, pelo amor, amizade e carinho, apesar da distância.

Ao Professor Mário Oleskovicz, pela oportunidade para a realização deste trabalho, e pela dedicação e paciência durante a orientação.

Ao Professor Alexandre Delbem, pela amizade, conselhos e ajuda durante toda a execução deste trabalho.

Aos Professores Denis Coury e José Carlos pelo incentivo e atenção dispensada em todos os momentos.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, e um agradecimento em especial à Jussara e à Marisa pela atenção e dedicação dispensada a todos os alunos do Departamento.

Aos demais professores e funcionários da USP - São Carlos, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos, companheiros e ex-companheiros de república: Clenilson, Diego, Filipe Matos, Kostela, Rafael e Rogério, pelos momentos de divertimento e pelo apoio nas horas de dificuldades. Um agradecimento especial aos amigos Lucas Padilha e Sérgio Pitombo, baianos por quem eu tenho muita amizade.

Aos conterrâneos do Piauí, que compartilharam de momentos de alegria e de saudades durante toda a minha estadia em São Carlos. Em especial agradeço à Aldir, Breno, Filipe Saraiva, Guilherme, Helson, Ricardo, Ronildo e Valdemir Jr com quem estabeleci grandes amizades.

Ao LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica) pela acomodação e equipamentos disponibilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos e companheiros do LSEE: Etienne, Patrick, Gerson, Ulisses, Monaro, Janison, Marcelo, Daniel, Wesley, Raphael, Rui e Athila, dentre outros, pela amizade e contribuições. Agradeço também ao companheirismo dos amigos e colegas da pós-graduação dos demais laboratórios da EESC e do ICMC.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Resumo

BRANCO, H. M. G. C. Modelagem Multiobjetivo para o Problema da Alocação de Monitores de Qualidade da Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 111 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

Problemas ocasionados por perturbações na qualidade da energia elétrica (QEE) podem provocar sérios prejuízos, tanto de cunho social, quanto financeiros, aos clientes conectados ao sistema elétrico de potência como um todo. Neste contexto, os clientes que mais sofrem são os clientes industriais, pois estes possuem cargas sensíveis a vários distúrbios associados à falta da QEE. Sendo assim, para adoções de medidas preventivas, ou corretivas, que melhorem os índices de QEE, faz-se necessário um monitoramento dos sistemas elétricos que permita um melhor acompanhamento da ocorrência dos distúrbios. Nesta pesquisa é proposta a modelagem do problema de alocação ótima de monitores de QEE em sistemas de distribuição com múltiplos objetivos, os quais são: minimização do custo do monitoramento, minimização da ambiguidade topológica, maximização do monitoramento das cargas, maximização da quantidade de ramais monitorados, minimização da quantidade de afundamentos não monitorados, e maximização da redundância do monitoramento dos afundamentos. Na resolução do problema foi utilizado o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com Tabelas (AEMT), adotado por ter boa capacidade de resolução com muitos objetivos. Os resultados obtidos permitiram observar que o AEMT forneceu as fronteiras de Pareto com soluções diversificadas e bem distribuídas ao longo da mesma, mostrando-se de grande relevância para o planejamento de sistemas de monitoramento da QEE em sistemas de distribuição de energia. A principal contribuição desta tese é o fornecimento de um modelo que permite às empresas de energia avaliar os investimentos que farão nos seus sistemas de monitoramento considerando seis critérios distintos, permitindo uma maior flexibilidade no estabelecimento do plano de monitoramento e uma melhor análise

do custo/benefício considerando os seis aspectos abordados.

Palavras-Chave:

Sistemas Elétricos de Potência; Qualidade da Energia Elétrica; Sistemas de Distribuição; Alocação de Monitores; Otimização Multiobjetivo; Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.

Abstract

BRANCO, H. M. G. C. Multiobjective modeling for the Problem of Allocation of Power Quality Monitors in Electrical Distribution System. 111 P . Ph.D Thesis - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, in 2013.

Problems arising from disturbances in power quality (PQ) can cause serious damage, both social, and financial, to customers connected to the electrical power distribution systems as a whole. In this context, the customers who suffer most are industrial customers, as they have loads sensitive to various disturbances associated with the lack of PQ. Thus, in order to adopt preventive or corrective measures to improve PQ rates, it is necessary to monitor electrical systems to allow better oversight of the occurrence of disturbances. In this research, the proposal is to model the problem of optimal allocation of power quality monitors in distribution systems with multiple objectives. The multiple objectives are: minimizing the monitoring cost, minimizing ambiguities in topology, maximizing the load monitoring, maximizing the area monitoring, minimizing the voltage sag unmonitored, and maximizing the redundancy in the sag monitoring. In solving the problem, a Multiobjective Evolutionary Algorithm with Tables (MEAT) was adopted due to ability to deal with many objectives. The results show that the AMET finds a set of efficient solutions that are diversified and well-distributed along the Pareto Front, and that they are highly relevant for planning of PQ monitoring systems in electrical power distribution systems. The main contribution of this thesis is to provide a model that allows utilities better evaluate investments that they will make in their monitoring systems comprising six different criteria, allowing greater flexibility in establishing the monitoring plan and a better analysis of cost/benefit considering the six aspects.

Keywords

Electrical Power Distribution Systems; Power Quality; Distribution Systems; Allocation

Monitors; Multiobjective Optimization; Multiobjective Evolutionary Algorithms.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1	Sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia observados sob a ótica do mercado desregulamentado. [Adaptado de Bollen e Gu (2006).]	4
FIGURA 1.2	Esquema ilustrativo de um monitoramento distribuído em um sistema de distribuição de energia.	5
FIGURA 2.1	Fluxograma do algoritmo do método das posições de falta. [Adaptado de Kempner (2012).]	15
FIGURA 2.2	Exemplo de um sistema de distribuição de energia qualquer com 6 barras.	15
FIGURA 3.1	Custo <i>versus</i> Conforto das opções de automóveis disponíveis para compra.	28
FIGURA 3.2	Ilustração das fronteiras de Pareto de três níveis de dominância.	29
FIGURA 3.3	Fluxograma básico de um AG.	34
FIGURA 3.4	Cálculo da distância de aglomeração.	35
FIGURA 3.5	Procedimento de seleção do NSGA-II apresentado por Deb (2001).	36
FIGURA 3.6	Procedimento de seleção do algoritmo AEMT.	38
FIGURA 4.1	Representação unifilar de um circuito de distribuição com 6 barras.	40
FIGURA 4.2	Representação em árvore do SD com 6 barras.	41
FIGURA 4.3	Representação em árvore do SD com 6 barras com as propriedades e numerações atribuídas.	42
FIGURA 4.4	Aplicação das regras de posicionamento dos monitores.	44

FIGURA 4.5	Propagação dos afundamentos de tensão no SD e sua relação com a alocação dos monitores.	45
FIGURA 4.6	Procedimento para determinar se um componente c_{ij} é ambíguo.	49
FIGURA 4.7	Monitores de QEE alocados no SD de 6 barras.	51
FIGURA 4.8	Exemplo da aplicação do AEMT ao problema proposto. a) Sistema exemplo de 6 barras e 13 componentes. b) Representação em árvore do sistema de 6 barras. c) Vetor alocação para o sistema de 6 barras, com comprimento igual a 13.	54
FIGURA 4.9	Exemplo de indivíduos de uma população para aplicação do AEMT no SD de 6 barras.	55
FIGURA 4.10	Fronteira de Pareto formada pelos indivíduos da Tabela 4.3.	57
FIGURA 5.1	Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 13 barras.	62
FIGURA 5.2	Alimentador IEEE de 13 barras modelado no <i>software DIgSILENT PowerFactory</i> , apresentando os valores após execução da rotina de cálculo de fluxo de carga.	63
FIGURA 5.3	Alimentador IEEE de 13 barras modelado no <i>software DIgSILENT PowerFactory</i> , apresentando os valores das tensões nas barras para um curto-circuito trifásico franco aplicado na barra 671.	64
FIGURA 5.4	Representação gráfica da MTDF para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito trifásico franco em cada uma das barras.	66
FIGURA 5.5	Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito franco em cada uma das barras e limiar igual à 0,9 pu.	67
FIGURA 5.6	Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito franco em cada uma das barras e um limiar igual à 0,4 pu.	67
FIGURA 5.7	Representação gráfica da MTDF para o sistema de 13 barras, considerando curtos-circuitos nas barras, com impedância de falta variando entre 0 e 5 ohms.	68
FIGURA 5.8	Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando a MTDF da Figura 5.7 e um limiar igual à 0,9 p.u..	69

FIGURA 5.9	Circuito alimentador do sistema de distribuição de 37 barras do IEEE.	72
FIGURA 5.10	Representação gráfica da MTDF para o sistema de 37 barras, considerando curtos-circuitos francos nas barras.	73
FIGURA 5.11	Representação gráfica da MC para o sistema de 37 barras, considerando a MTDF da Figura 5.10 e limiar igual à 0,9 pu.	73
FIGURA 5.12	Circuito alimentador do sistema de distribuição de 34 barras do IEEE.	77
FIGURA 5.13	Representação gráfica da MTDF para o sistema de 34 barras, considerando curtos-circuitos francos nas barras.	78
FIGURA 5.14	Representação gráfica da MC para o sistema de 34 barras, considerando a MTDF da Figura 5.13 e limiar igual à 0,9 pu.	78
FIGURA 6.1	Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.	83
FIGURA 6.2	Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu.	86
FIGURA 6.3	Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos com impedâncias de faltas variadas, e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu.	89
FIGURA 6.4	Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.	91
FIGURA 6.5	Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 34 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.	95

FIGURA 6.6	Fronteira de Pareto obtida utilizando uma função de ponderação para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras (Branco <i>et al.</i> , 2011).	96
FIGURA 6.7	Comparação entre metodologias diferentes para resolução do problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras.	98
FIGURA 6.8	Fronteira de Pareto obtida utilizando uma função de ponderação para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras (Branco <i>et al.</i> , 2011).	99
FIGURA 6.9	Comparação entre metodologias diferentes para resolução do problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras.	100

Lista de Tabelas

TABELA 3.1	Opções de automóveis para aquisição. Nesta tabela o conforto representa o percentual de satisfação pessoal com a aquisição do veículo.	28
TABELA 4.1	Resumo dos objetivos de problema de otimização.	53
TABELA 4.2	Tabelas de subpopulações avaliadas de acordo com os seis objetivos do problema e por ponderações entre os objetivos.	55
TABELA 4.3	Conjunto de Pareto que representa a solução para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 6 barras.	56
TABELA 5.1	Trechos do circuito alimentador IEEE de 13 barras.	61
TABELA 5.2	Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras.	61
TABELA 5.3	Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 13 barras.	61
TABELA 5.4	Matriz de tensões durante a falta para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito trifásico franco em cada uma das barras.	65
TABELA 5.5	Impedâncias de falta utilizadas em cada barra do SD de 13 barras para simulação dos curtos-circuitos.	68
TABELA 5.6	Trechos do circuito alimentador IEEE de 37 barras.	70
TABELA 5.7	Cargas conectadas em cada barra do circuito alimentador IEEE de 37 barras.	71
TABELA 5.8	Trechos do circuito alimentador IEEE de 34 barras.	75

TABELA 5.9	Cargas conectadas em cada barra do circuito alimentador IEEE de 34 barras.	76
TABELA 5.10	Cargas modeladas com parâmetros distribuídos do circuito alimentador IEEE de 34 barras.	76
TABELA 6.1	Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 13 barras, considerado a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos	85
TABELA 6.2	Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 13 barras, considerado a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos	87
TABELA 6.3	Impedâncias de falta utilizadas em cada barra do SD de 13 barras para simulação dos curtos-circuitos.	88
TABELA 6.4	Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 37 barras, considerado a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

AE Algoritmos Evolutivos

AEMO Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo

AEMT Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com Tabelas

AG Algoritmos Genéticos

B&B *Branch and Bound*

FRD Fator de Redundância dos Dados

MTDF Matriz de Tensões Durante a Falta

MPF Método da Posição de Faltas

MMC Método de Monte Carlo

MQEE Monitores de Qualidade da Energia Elétrica

MOGA *Multi-Objective Genetic Algorithm*

NSGA *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*

PAC Ponto de Acoplamento Comum

PPL Problema de Programação Linear

QEE Qualidade da Energia Elétrica

SEP Sistema Elétrico de Potência

SD Sistema de Distribuição

SF Sistema *Fuzzy*

SPEA-II *Strength Pareto Evolutionary Algorithm II*

VEGA *Vector Evaluated Genetic Algorithm*

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

VTLD Variações de Tensão de Longa Duração

Capítulo 1

Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) está constantemente sujeito à ocorrência de curtos-circuitos que podem provocar variações de tensão, ou mesmo a interrupção do fornecimento de energia. Também neste sentido, algumas manobras sobre o sistema como, por exemplo, a entrada de grandes blocos de cargas, ou o chaveamento de bancos de capacitores, podem originar alterações no fornecimento da energia. Além disso, alguns tipos de cargas conectadas ao SEP, como as cargas não lineares, as quais não apresentam uma relação linear entre a tensão e a corrente, podem provocar o surgimento de tensões e correntes harmônicas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Estas cargas não lineares são caracterizadas por correntes harmônicas que interagem com a impedância e outras cargas do sistema, poluindo-o com harmônicos. Como fato, tem-se que a ocorrência de algum destes e de muitos outros distúrbios em um SEP pode danificar ou provocar operações incorretas de equipamentos elétricos sensíveis conectados ao sistema, caracterizando um problema de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Sendo assim, a QEE constitui um fator crucial para a competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços. O conceito da falta de qualidade da energia está relacionado a um conjunto de alterações nas tensões, correntes e frequência que podem ocorrer no SEP (Santoso *et al.*, 2002). Da prática, costuma-se associar a QEE à qualidade da tensão, uma vez que os distúrbios manifestados na corrente, e dependentes das características das cargas, também se refletem na tensão do sistema e este é o parâmetro sobre o qual as concessionárias têm controle (Bollen e Gu, 2006).

Cabe colocar que existem padrões muito bem definidos para determinar a qualidade da tensão, tais como: uma forma de onda o mais próximo possível de uma senoide, a simetria

do sistema elétrico e amplitudes das tensões dentro de limites aceitáveis (Santoso *et al.*, 2002). Desta forma, para manter o nível de tensão dentro de certos limites operacionais aceitáveis, tanto em nível de transmissão, como de distribuição, são necessárias medidas de controle e de acompanhamento dos órgãos de fiscalização, das concessionárias fornecedoras de energia e, também, dos fabricantes de equipamentos e dos consumidores finais.

Como fato, tem-se que os problemas associados aos distúrbios de QEE podem causar falha ou má operação de aparelhos ligados ao SEP, ocasionando sérios prejuízos às concessionárias de energia e aos consumidores, principalmente em nível industrial. Neste cenário, considerando as atuais características do sistema elétrico, que possui uma grande quantidade de cargas não lineares e sensíveis aos distúrbios, a tendência é que os problemas relacionados à má QEE se agravem e, por consequência, os prejuízos associados devem ser elevados (Bollen e Gu, 2006). Por isso, muitos esforços têm sido direcionados para amenizar os transtornos e prejuízos decorrentes da falta de QEE.

Para o contexto apresentado, o constante monitoramento da QEE é o primeiro passo para se tomar medidas corretivas, e identificar as fontes de distúrbios no sistema. Embora seja possível o monitoramento de uma barra específica do SEP, é de interesse que todo o sistema seja monitorado, possibilitando diferentes aplicações, tais como: diagnóstico; localização de eventos associados à falta de QEE; compartilhamento de informação entre locais remotos; estudo da propagação de eventos de qualidade no sistema; avaliação do custo da QEE; e melhoria de programas de manutenção preventiva, dentre outras (Eldery *et al.*, 2006). Em contra-partida, um investimento que possibilite o monitoramento completo do sistema é relativamente alto, e seus custos estão associados ao valor elevado dos monitores, de sua implantação e manutenção, bem como dos canais de comunicação para o resgate e processamento de todas as informações registradas. No entanto, as dificuldades de um monitoramento completo não se limitam ao valor do investimento, incluem também a escolha dos melhores locais nos quais os equipamentos de monitoramento deverão ser instalados. Ainda mais, por questões técnicas e operacionais, sob o contexto da QEE, não se tem o prévio conhecimento dos pontos de instalação dos monitores que poderão fornecer a melhor observação da situação de operação enfrentada pelo sistema de energia. Além disto, os distúrbios tem um caráter estocástico, o que dificulta mais ainda o estabelecimento de um plano de monitoramento.

Pelos entraves apresentados, e na falta de campanhas de monitoramento eficientes e realmente representativas, metodologias analíticas que proporcionem um melhor conhecimento do

SEP e facilitem a identificação de pontos críticos, têm se mostrado de importância considerável para estudos relacionados à QEE (Olguin *et al.*, 2005; Espinosa-Juarez e Hernandez, 2007). Com um melhor conhecimento do sistema, proveniente da simulação e análise do mesmo, e pelo emprego de adequadas metodologias, é possível prever o comportamento deste perante a ocorrência de problemas de QEE, o que facilita a descoberta das possíveis fontes e causas dos distúrbios, possibilitando melhores soluções, e contribuindo para uma melhora do sistema elétrico como um todo. As metodologias de análise e predição de comportamento do SEP frente aos distúrbios de QEE podem ainda auxiliar na alocação otimizada dos monitores de qualidade da energia, pois sugerem como monitorar o sistema por pontos chaves que permitam uma análise global do SEP (Espinosa-Juarez *et al.*, 2009). Desta maneira, o monitoramento dos pontos mais relevantes para os estudos relacionados à QEE, por meio de monitores distribuídos ao longo dos sistemas elétricos, permitirá um melhor gerenciamento da QEE (Byman *et al.*, 2000).

1.1 Motivação

Com a desregulamentação do setor elétrico, que ocorreu tanto a nível nacional quanto mundial, passaram a existir várias empresas de distribuição, transmissão e geração de energia independentes, econômica e administrativamente, atuando no mercado de energia. Entretanto, todas estão interconectadas eletricamente e comercializam ou recebem dividendos pela disponibilização do mesmo produto - a energia elétrica. Neste cenário, estas empresas passam cada uma a defender seus próprios interesses, muitas vezes sem se preocupar com o sistema elétrico como um todo, e a competir por clientes. Esta concorrência ocorre principalmente em relação à captação de clientes industriais de grande porte, que podem escolher de qual empresa comprar energia. A Figura 1.1 é do cenário descrito. Na Figura 1.1(a) tem-se um sistema de transmissão sendo caracterizado como um ponto comum entre os vários outros sistemas ou sub-sistemas. Na interface com estes outros sistemas, residem as principais preocupações e intervenções necessárias associadas à QEE. Já na Figura 1.1(b) o ponto denotado como comum aos demais é um Sistema de Distribuição (SD). Novamente, das ocorrências de distúrbios no SD, ou nos demais sistemas (sub-sistemas), em virtude das conexões existentes, problemas de QEE poderão ser propagados sobre o sistema como um todo.

Em virtude da concorrência entre as empresas de energia, da exigência cada vez maior dos clientes quanto aos níveis de QEE, e da necessidade de captação de novos clientes, tem-se uma busca constante por melhorias nos níveis da QEE fornecida. Contudo, para promover

Figura 1.1: Sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia observados sob a ótica do mercado desregulamentado. [Adaptado de Bollen e Gu (2006).]

tais melhorias é preciso realizar o monitoramento do sistema elétrico para identificar o que precisa ser melhorado. Faz-se necessário, por exemplo, verificar se os problemas são oriundos de alguns clientes em específico, ou de outra empresa de energia que está conectada ao mesmo sistema.

Com este intuito, um monitoramento de todas as barras do sistema seria o ideal. Todavia, o mesmo é bastante oneroso e tecnicamente impraticável com os custos atuais. É possível, contudo, realizar o monitoramento dos sistemas com monitores distribuídos por alguns pontos, obtendo-se melhorias significativas no gerenciamento da QEE (Byman *et al.*, 2000). Vários autores mostram vantagens deste tipo de monitoramento, principalmente quando se dispõe de canais de comunicação para aquisição e troca das informações (Moreno-Munoz e Gonzalez De La Rosa, 2008; Yi *et al.*, 2010; Colnago *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010).

A Figura 1.2 é relativa à ideia de monitoramento distribuído com compartilhamento da informação para um SD. De acordo com as propostas observadas na literatura correlata, vários Monitores de Qualidade da Energia Elétrica (MQEE) enviariam informação para um servidor central, onde seria caracterizada uma base de dados dos distúrbios registrados e associados à QEE. Assim, os dados históricos armazenados em conjunto com os dados atuais medidos poderiam ser utilizados em estudos mais detalhados sobre o desempenho do sistema, além de possibilitar a estimação do estado da QEE nos pontos não monitorados (Espinosa-Juarez *et al.*, 2009).

Para um monitoramento eficaz no que diz respeito à QEE, é preciso escolher os melhores pontos para instalação dos monitores, considerando o montante de recursos disponível para o investimento. Dependendo das exigências dos clientes, ou dos tipos de distúrbios mais comuns em um determinado sistema, várias propostas diferentes podem ser adotadas para a

Figura 1.2: Esquema ilustrativo de um monitoramento distribuído em um sistema de distribuição de energia.

alocação dos monitores. Existem, por exemplo, aquelas voltadas para garantir a cobertura total das ocorrências de afundamentos de tensão (Espinosa-Juarez *et al.*, 2009), e outras propostas preocupadas em garantir uma redundância no monitoramento destes eventos (Salim e Nor, 2008, 2010). Outros autores procuram otimizar a alocação dos monitores para proporcionar uma boa localização das faltas incidentes no SEP (Guerra e Kagan, 2009). Existem ainda, trabalhos que buscam otimizar a alocação para o monitoramento da distorção harmônica (Muscas *et al.*, 2007), e ainda outros para a localização das fontes relacionadas à origem das flutuações de tensão, as quais se manifestam visualmente pela cintilação luminosa (*flicker*) (Moaddabi *et al.*, 2008).

Nota-se que existem diversos critérios que podem ser observados e analisados para o estabelecimento de um plano de monitoramento otimizado. Todavia, pelas metodologias encontradas até o momento na literatura, o planejamento do monitoramento é otimizado para um determinado tipo de evento. Por outro lado, é sabido que os sistemas elétricos estão sujeitos a serem acometidos, a qualquer momento, por qualquer tipo de distúrbio. Logo, seria conveniente considerar este fator na modelagem das propostas de otimização.

Outro aspecto que se percebe nos trabalhos propostos na literatura é a preocupação de apontar o sistema de monitoramento que necessite do menor investimento possível para a sua implantação. Contudo, sabe-se também que em problemas de minimização de custos sempre existe uma relação de custo/benefício entre o valor que se pretende investir e a qualidade

proporcionada pelo investimento realizado. A qualidade proporcionada pelo investimento mínimo, apesar de atender todas as restrições impostas pelo problema, geralmente não é a mais adequada que se pode obter. Além disto, podem existir soluções que necessitem de um maior investimento, mas no entanto tenham uma relação de custo/benefício igual ou melhor que a solução de menor custo.

Neste cenário, seria bastante interessante proporcionar às empresas de energia opções com diferentes relações de custo/benefício, e deixá-las escolher até quanto estariam dispostas a investir em seus sistemas de monitoramento para obter melhores resultados. Outro aspecto interessante seria possibilitar a análise de uma futura expansão do sistema de monitoramento, a partir da já existente, decorrente de novos investimentos (recursos), ou da queda dos custos dos equipamentos e dos canais de comunicação necessários para a proposta como um todo.

1.2 Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa consiste na modelagem e resolução do problema de alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição de energia elétrica. Será apresentada uma modelagem multiobjetivo para o problema, na qual são avaliados no estabelecimento do plano de monitoramento, aspectos relacionados com a melhoria do sistema de monitoramento e a minimização dos custos totais da monitoração do sistema.

Dentre os aspectos relacionados à melhoria do sistema de monitoramento, tem-se a minimização da ambiguidade topológica, com a qual consegue-se maximizar a quantidade de elementos do sistema de distribuição que possam ter suas tensões e correntes medidas, ou calculadas, pelos monitores alocados. Com isto, espera-se um monitoramento adequado sistema elétrico no contexto da QEE. Pretende-se também maximizar a cobertura do monitoramento frente às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e, destas, em específico, dos afundamentos de tensão, uma vez que estes são os eventos mais comuns no sistema elétrico e os responsáveis pelas maiores perdas econômicas do setor industrial (Bollen e Gu, 2006).

Para o estabelecimento do plano de monitoramento, a metodologia desenvolvida considera a topologia do sistema em análise, permitindo, além da minimização da ambiguidade topológica, maximizar o monitoramento das cargas e dos ramais laterais monitorados. Ainda em relação ao estabelecimento do plano de monitoramento, aplicou-se o Método da Posição de Falhas (MPF) e o cálculo de curto-circuito, para determinar os melhores pontos de instalação dos monitores,

no que se refere à cobertura dos afundamentos de tensão. Esta consideração deve permitir a percepção do maior número possível de ocorrências das VTCD.

1.3 Contribuição do Trabalho

A principal contribuição desta tese é o fornecimento de um modelo que permite às empresas de energia avaliar os investimentos atuais e futuros no sistema de monitoramento da qualidade da energia elétrica considerando seis critérios distintos. Pelos resultados obtidos é possível realizar um estudo da viabilidade técnica-financeira do investimento. Com auxílio da ferramenta proposta pode-se optar por otimizar o sistema de monitoramento para determinados critérios, ou por buscar um equilíbrio entre os diversos critérios que foram utilizados na modelagem do problema.

1.4 Considerações Finais e Organização do Documento

Pela metodologia a ser apresentada, pretende-se fornecer às empresas de energia mecanismos para discutir e planejar o sistema de monitoramento junto aos órgãos de fiscalização e consumidores. A análise dos resultados proveniente da aplicação do modelo proposto viabilizará um planejamento imediato e a longo prazo para a instalação dos monitores, pois, caso não seja possível a implementação de um monitoramento do sistema por completo, apontar-se-á os locais prioritários para o início da instalação, elencando-se os pontos em que deverão ser instalados na sequência os novos aparelhos, na medida em que estes forem adquiridos.

Diante do exposto, apresenta-se no que segue a estrutura deste documento:

- Capítulo 1 - Introdução;
- Capítulo 2 - Estado da Arte na Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica;
- Capítulo 3 - Otimização Multiobjetivo e Algoritmos Aplicados;
- Capítulo 4 - Modelagem Proposta para Alocação de Monitores de QEE em Sistemas de Distribuição de Energia;
- Capítulo 5 - Sistemas Elétricos Analisados;
- Capítulo 6 - Resultados Obtidos;

- Capítulo 7 - Conclusões e Continuidade da Pesquisa.

Capítulo 2

Estado da Arte na Alocação de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica

A alocação de monitores de QEE é um problema que vem ganhando bastante destaque nos últimos anos. Vários pesquisadores vislumbram a importância do estabelecimento de um plano de monitoramento que seja eficiente, com o menor custo possível. Entretanto, o termo eficiência nem sempre se refere ao mesmo parâmetro nas várias pesquisas que vem sendo desenvolvidas. Alguns trabalhos procuram estabelecer um plano de monitoramento que seja eficiente para o monitoramento de um determinado tipo de distúrbio, como, por exemplo, afundamentos de tensão. Outros trabalhos apontam para metodologias que permitem alocar os monitores de forma que seja possível localizar eficientemente as fontes dos distúrbio. Existem também aqueles que oferecem soluções nas quais garante-se que todas as variáveis de estado do sistema possam ser medidas pelos monitores, ou calculadas a partir das medidas registradas. Além destas, várias outras abordagens estão disponíveis na literatura sugerindo modelos de otimização que permitem minimizar o custo do monitoramento obedecendo restrições que possibilitam atender a um determinado critério de eficiência.

Este capítulo tem por objetivo apresentar e discutir alguns dos relevantes trabalhos encontrados até o momento, no que se refere à alocação otimizada de monitores de QEE, refletindo o estado da arte das propostas na abordagem deste problema. Cabe colocar que antes de iniciar a discussão dos trabalhos relacionados, serão apresentados conceitos básicos sobre a QEE e

algumas das técnicas utilizadas recorrentemente nos trabalhos consultados sobre alocação de monitores no contexto apresentado.

2.1 Conceitos Básicos Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica

O objetivo das redes de energia é de permitir o transporte da energia elétrica para os diferentes clientes, garantindo uma tensão aceitável, bem como as correntes requeridas pelas cargas dos consumidores. Neste contexto, a qualidade da energia fornecida pode ser manifestada da interação entre a rede e seus clientes por meio dos sinais das tensões e correntes trifásicas registradas (Bollen e Gu, 2006). Segundo este ponto de vista, um distúrbio da QEE só se torna um problema na interface entre a rede e seus clientes.

Uma boa QEE é verificada quando se tem qualidade da tensão somada à qualidade da corrente elétrica. Define-se a tensão ideal como sendo senoidal com amplitude e frequência constantes e iguais aos valores nominais. Já a corrente ideal é senoidal, também com amplitude e frequência constantes, e iguais aos valores nominais especificados. Alguns autores colocam que qualquer desvio de tensão ou corrente do ideal é um distúrbio de QEE (Bollen e Gu, 2006). Por outro lado, grande parte dos autores apontam que existe um problema de QEE apenas quando os desvios dos padrões definidos transgridem alguns índices preestabelecidos (Dugan *et al.*, 2003). Contudo, é pertinente analisar cada caso separadamente, pois um desvio dos padrões definidos como ideais só se configura em um real problema quando causa prejuízos aos consumidores, tenha este desvio transgredido ou não os limites aceitáveis (Bollen e Gu, 2006; Bollen *et al.*, 2012; Esteves *et al.*, 2011).

São vários os distúrbios que podem interferir e refletir na QEE fornecida (Dugan *et al.*, 2003). Estes estão enumerados a seguir:

- VTCD: caracterizadas pela permanência do nível de tensão fora da faixa nominal durante um intervalo de tempo superior à 0,5 ciclos e inferior a um minuto. Quanto à amplitude da tensão, as VTCD subdividem-se em afundamentos de tensão (amplitude da tensão entre 10% e 90% da tensão nominal), elevação de tensão (amplitude da tensão superior a 110% da tensão nominal) e interrupção (amplitude da tensão inferior a 10% da tensão nominal). Já quanto à duração, estas podem ser instantâneas (duração entre 0,5 ciclos e 30 ciclos), momentâneas (duração entre 30 ciclos e 3 segundos), ou temporárias (duração entre 3 segundos e 1 minuto);

- Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD): caracterizadas pela permanência do nível de tensão fora da faixa nominal durante um intervalo de tempo superior 1 minuto. As VTLD subdividem-se em subtensão (amplitude da tensão entre 10% e 90% da tensão nominal), sobretensão (amplitude da tensão superior a 110% da tensão nominal) e interrupção sustentada (com a completa perda da energia elétrica);
- Transitórios: caracterizados por alterações súbitas nas formas de onda da corrente, resultando um abrupto, mas breve aumento da tensão. Podem ser classificados em dois grupos: os transitórios impulsivos causados por descargas atmosféricas, e os transitórios oscilatórios, causados principalmente por chaveamentos sobre o sistema elétrico;
- Desequilíbrios de tensão: podem ser definidos por meio da teoria de componentes simétricos, sendo que a razão entre os componentes de sequência negativo ou zero, com o componente de sequência positivo pode ser usada para especificar a percentagem do desequilíbrio;
- Flutuações de tensão: são variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão, ou uma série de mudanças aleatórias, cujas amplitudes normalmente não excedem faixas de valores preestabelecidos. Em decorrência das flutuações, podem-se caracterizar as cintilações luminosas (ou o efeito *Flicker*) que são perceptíveis ao olho humano;
- Distorções de tensão: as quais podem ser sub-divididas em:
  - Nível CC: caracterizada pela presença de um componente CC na tensão ou na corrente em um sistema de energia que opera em corrente alternada;
  - Harmônicos: caracterizados pela presença de frequências que são múltiplas inteiras da frequência nominal do sistema nas formas de onda da tensão e da corrente;
  - Inter-harmônicos: caracterizados pela presença de frequências que não são múltiplas inteiras da frequência nominal do sistema nas formas de onda da tensão e da corrente;
  - Notching*: o qual é caracterizado por uma condição periódica na tensão, causada pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra; e
  - Ruído: caracterizado por sinal elétrico indesejado de alta frequência que altera a forma de onda da tensão.

Os distúrbios da QEE podem ser divididos em duas grandes classes (Bollen e Gu, 2006):

Eventos e Variações. As variações ocorrem em estado estacionário (ou quase estacionário) e requerem medições contínuas. Já os eventos são perturbações repentinas com um começo e um fim bem delimitados.

Associada à classe dos eventos, têm-se, por exemplo:

- as VTCD;
- as VTLD; e
- os Transitórios.

As variações, por sua vez, englobam os seguintes distúrbios:

- Variações na frequência da tensão;
- Variações de amplitude de tensão;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão (que causa como efeito a cintilação luminosa ou *Flicker*);
- Nível CC;
- Harmônicos;
- Inter-harmônicos;
- *Notching*; e
- Ruído.

Uma forma eficiente de distinção entre as variações e os eventos é diferenciar pela maneira de medir/monitorar os distúrbios. A medição das variações é similar à medição do consumo de energia, realizada continuamente, como por exemplo, a medição da distorção harmônica do sistema. Já a medição dos eventos é similar ao funcionamento de um relé de proteção, ou seja, requer um mecanismo de disparo, como por exemplo a medição de um afundamento de tensão, que realiza o registro somente após a tensão ficar abaixo de um valor pré-determinado (normalmente 0,9 p.u.).

Dentre os distúrbios associados à QEE, as VTCD, e mais especificamente, os afundamentos de tensão, são os que provocam os maiores prejuízos aos consumidores industriais (Bollen

et al., 1998; Becker *et al.*, 1994; McGranaghan *et al.*, 1993). A ocorrência destes eventos pode sensibilizar os dispositivos de proteção acarretando em paralisação de processos industriais, ou afetar o correto funcionamento de equipamentos diversos. Desta maneira, os prejuízos ocorrem em função de: perda de produção, trabalhadores ociosos, custos com danos e reparos de equipamentos, e custos de reinicialização do processo de produção, entre outros (Kagan *et al.*, 2009).

Como principais causas dos afundamentos de tensão, citam-se a partida de grandes motores, o chaveamento de bancos de capacitores, ou de grandes blocos de carga, e a ocorrência de curtos-circuitos. Os afundamentos causados pelos chaveamentos e pela partida de motores, além de não serem de grande intensidade, são facilmente contornados. Já os curtos-circuitos, provocam uma grande elevação da corrente e, conseqüentemente, afundamentos severos (Kempner, 2012).

Além de serem responsáveis pelos afundamentos mais severos, os curtos-circuitos são os responsáveis pela grande maioria dos afundamentos observados nas redes de distribuição de energia (Kempner, 2012). Um dos principais fatores associados com a intensidade dos afundamentos de tensão, é o local onde ocorreu a falta que originou o afundamento. Se o local onde ocorreu a falta possuir uma alta potência de curto-circuito, a severidade do afundamento associado será maior e poderá ser percebida por uma grande extensão do sistema. Por outro lado, se um curto-circuito ocorre em um local com baixa potência de curto-circuito, o afundamento associado será menos severo e, provavelmente, percebido em uma extensão menor do sistema (Olguin e Bollen, 2003b). Neste contexto, a propagação dos afundamentos de tensão remete a dois conceitos importantes: o de área de vulnerabilidade (ou área exposta), e o de área afetada.

A área afetada por uma barra k de um sistema elétrico de potência qualquer, é dada por toda a região em que, caso ocorra uma falta na barra k , ocorrerá afundamento de tensão com intensidade suficiente para afetar a operação dos equipamentos conectados ao sistema. Percebe-se então que quanto maior a potência de curto-circuito de uma barra, maior será a sua área afetada (Olguin e Bollen, 2003b).

A área de vulnerabilidade de uma barra k é dada por toda a região em que, caso ocorra uma falta, acarretará em um afundamento de tensão na barra k com intensidade suficiente para afetar a operação de equipamentos conectados a mesma. Percebe-se que quanto menor a potência de curto-circuito de uma barra, maior é a sua área de vulnerabilidade (Olguin e Bollen, 2003b).

Um método bastante utilizado para determinar a área afetada e a área de vulnerabilidade é o método das posições de falta (Conrad *et al.*, 1991). Este método é utilizado em diversos estu-

dos direcionados à propagação dos afundamentos de tensão, bem como em muitos trabalhos destinados à alocação de monitores de QEE para o monitoramento de afundamentos de tensão. Este método será explanado a seguir.

2.1.1 Método das posições de falta

O método das posições de falta foi proposto por Conrad *et al.* (1991) para o cálculo de afundamentos de tensão em sistemas de transmissão de grande porte. Este método consiste na simulação de um curto-circuito em cada uma das barras do sistema (uma por vez), seguido do cálculo das tensões remanescentes em todas as demais barras. Desta forma, é possível determinar os afundamentos de tensão em todo o sistema elétrico sob análise, para qualquer situação de falta em um nó do sistema.

Inicialmente, o método das posições de falta foi desenvolvido para ser empregado em sistemas malhados, contudo vários trabalhos têm mostrado sua eficácia também para aplicações em sistemas radiais, como os sistemas de distribuição (Goswami *et al.*, 2008b,a; Carpinelli *et al.*, 2009; Goswami *et al.*, 2009). A Figura 2.1 é o fluxograma do algoritmo do método das posições de falta, conforme o qual, a cada posição de falta f (geralmente uma barra do sistema), é simulada uma situação de curto-circuito, e as tensões em todas as outras barras do sistema calculadas e armazenadas. O algoritmo é executado até que todas as posições das faltas sejam contempladas, ou seja, até que tenha sido realizado o cálculo do curto-circuito em todas as barras desejadas. Pelo método, as tensões remanescentes podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$T_{(k,f)} = T_{(PF)} - \frac{Z_{(k,f)}}{Z_{(f,f)}}, \quad (2.1)$$

em que $T_{(k,f)}$ é a tensão na barra k devido uma falta na barra f , $T_{(PF)}$ é a tensão de pré-falta na barra k (normalmente considerada como 1 p.u.), $Z_{(k,f)}$ é a impedância de curto-circuito da barra k dada uma falta em f , e $Z_{(f,f)}$ é a impedância de curto-circuito da barra f dada uma falta em f .

De posse das tensões remanescentes, é construída a Matriz de Tensões Durante a Falta (MTDF), na qual as colunas possibilitam determinar as áreas afetadas pelas faltas aplicadas em cada uma das barras, e as linhas possibilitam determinar a área de vulnerabilidade de cada barra. Para um sistema de distribuição hipotético representado na Figura 2.2, a MTDF seria construída conforme apresentado na Equação (2.2).

Figura 2.1: Fluxograma do algoritmo do método das posições de falta. [Adaptado de Kempner (2012).]

Figura 2.2: Exemplo de um sistema de distribuição de energia qualquer com 6 barras.

Barra em curto: #1 —   #2 —   #3 —   #4 —   #5 —   #6

$$MTDF = \begin{bmatrix} 1 - \frac{Z_{(1,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(1,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(1,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(1,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(1,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(1,6)}}{Z_{(6,6)}} \\ 1 - \frac{Z_{(2,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(2,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(2,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(2,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(2,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(2,6)}}{Z_{(6,6)}} \\ 1 - \frac{Z_{(3,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(3,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(3,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(3,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(3,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(3,6)}}{Z_{(6,6)}} \\ 1 - \frac{Z_{(4,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(4,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(4,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(4,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(4,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(4,6)}}{Z_{(6,6)}} \\ 1 - \frac{Z_{(5,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(5,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(5,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(5,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(5,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(5,6)}}{Z_{(6,6)}} \\ 1 - \frac{Z_{(6,1)}}{Z_{(1,1)}} & 1 - \frac{Z_{(6,2)}}{Z_{(2,2)}} & 1 - \frac{Z_{(6,3)}}{Z_{(3,3)}} & 1 - \frac{Z_{(6,4)}}{Z_{(4,4)}} & 1 - \frac{Z_{(6,5)}}{Z_{(5,5)}} & 1 - \frac{Z_{(6,6)}}{Z_{(6,6)}} \end{bmatrix} \begin{matrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ V5 \\ V6 \end{matrix} \quad (2.2)$$

A seguir serão apresentados e discutidos diversos trabalhos encontrados até o momento e de relevância para o desenvolvimento de modelos para a alocação otimizada de MQEE em sistemas de distribuição.

2.2 Trabalhos Relacionados ao Tema Proposto

Como ressaltado por Olguin e Bollen (2003b), os afundamentos de tensão são responsáveis por consideráveis perdas financeiras no setor industrial. Por este motivo é importante dispor de uma ferramenta que permita prever o desempenho de um sistema elétrico perante a ocorrência de afundamentos de tensão. É bastante relevante o conhecimento da quantidade e severidade dos afundamentos de tensão a que cada porção do sistema estará vulnerável, de modo a indicar, por exemplo, as melhores áreas para a instalação de novas indústrias, ou para negociar da melhor forma possível os contratos de fornecimento de energia. Entretanto, estes distúrbios de QEE tem uma natureza estocástica devido aos vários fatores aleatórios que determinam sua ocorrência, duração e intensidade, o que dificulta bastante os estudos que visam determinar como é o comportamento de um determinado SEP em relação aos afundamentos de tensão.

Uma alternativa para verificar o comportamento do sistema elétrico é por meio do monitoramento de todas as barras do sistema por um longo período. Entretanto esta alternativa não é técnica e economicamente viável devido ao elevado custo e ao tempo dispendido com a sua aplicação. Mediante tal situação, Olguin e Bollen (2003b) e Pema *et al.* (2004), sugerem a utilização de simulações de curtos-circuitos, dispondo do método das posições de falta, para verificar o comportamento do sistema frente a ocorrência de afundamentos de tensão. Esta metodologia resulta em uma matriz com as tensões remanescentes (em pu) em cada uma das

barras, como ilustrado pela MTDF indicada pela Equação (2.3), obtida para um sistema genérico de seis barras como o da Figura 2.2. Os autores consideraram uma taxa de falhas por ano para cada barra do sistema, e, posteriormente, calcularam a quantidade e severidade dos afundamentos esperados para cada ponto do sistema durante o período em análise.

$$\begin{array}{l}
 \text{Barra em curto:} \quad \#1 \text{ — } \#2 \text{ — } \#3 \text{ — } \#4 \text{ — } \#5 \text{ — } \#6 \\
 \\
 MTDF = \left[\begin{array}{cccccc}
 0,0 & 0,65 & 0,95 & 0,91 & 0,93 & 0,70 \\
 0,65 & 0,0 & 0,80 & 0,96 & 0,94 & 0,45 \\
 0,95 & 0,80 & 0,0 & 0,75 & 0,40 & 0,91 \\
 0,91 & 0,96 & 0,75 & 0,0 & 0,30 & 0,92 \\
 0,93 & 0,94 & 0,40 & 0,30 & 0,0 & 0,85 \\
 0,70 & 0,45 & 0,91 & 0,92 & 0,85 & 0,0
 \end{array} \right] \begin{array}{l}
 V1 \\
 V2 \\
 V3 \\
 V4 \\
 V5 \\
 V6
 \end{array} \quad (2.3)
 \end{array}$$

Wang *et al.* (2005) apresentam uma solução baseada em uma análise estatística para a estimação dos afundamentos de tensão em um sistema de distribuição de energia elétrica, predizendo sua intensidade e duração. Conforme apresentado pelos autores, é possível mapear a probabilidade da incidência de um afundamento de tensão em uma carga sensível, conectada em um determinado ponto do sistema em análise.

Posteriormente, Olguin, Karlsson, e Leborgne (2005) e Olguin *et al.* (2005) apresentaram uma comparação entre a aplicação do método das posições de falta, como proposto por Olguin e Bollen (2003b), e uma abordagem baseada em Simulação ou Método de Monte Carlo (MMC) para verificar o desempenho de um sistema elétrico perante os afundamentos de tensão. Nesses trabalhos, consideraram-se faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas com diferentes probabilidades de ocorrência. Considerou-se também a taxa de falhas por ano em cada linha do sistema analisado, com uma distribuição uniforme ao longo de cada trecho. Os autores ressaltam que as duas abordagens são importantes ferramentas para verificar e prever os índices de afundamentos de tensão observados em um longo período de tempo, pois apresentam os valores médios que serão observados neste intervalo de tempo para cada barra do sistema. Verificou-se que para um monitoramento de longo tempo, os resultados apresentados pelos dois métodos são semelhantes para a estimação dos índices de desempenho do sistema. Entretanto, o método que utiliza a abordagem pelo MMC é capaz de fornecer uma informação a mais que a outra abordagem, a variação dos índices de desempenho ao longo do tempo.

Outros trabalhos seguiram a mesma metodologia de análise. Goswami *et al.* (2008b) con-

sideraram também a ocorrência de faltas nas linhas entre as barras para prever os efeitos dos afundamentos de tensão e delimitar as áreas de vulnerabilidade em um sistema de distribuição de energia elétrica, bem como as áreas afetadas pela ocorrência de defeitos em determinados pontos do sistema. Destaca-se que Carpinelli *et al.* (2009) sugerem uma interpretação gráfica da MTDF que quantifica a intensidade do afundamento de tensão. Esta forma de apresentar os resultados fornece, por uma rápida inspeção visual, a situação das tensões remanescentes em todos os barramentos do sistema após a ocorrência da falta elétrica em cada um dos barramentos.

Goswami *et al.* (2008a) e Goswami *et al.* (2009) seguem a mesma ideia de utilizar uma metodologia analítica para prever os efeitos dos afundamentos de tensão (método das posições de falta), considerando em seus estudos faltas bifásicas, bifásicas-terra e faltas fase-terra, além das trifásicas. Goswami *et al.* (2008a) consideraram uma distribuição uniforme da taxa de falhas, enquanto Goswami *et al.* (2009), consideraram também distribuições normais e exponenciais, expondo a influência da distribuição das falhas ao longo do sistema nos afundamentos de tensão observados.

A utilização da taxa de falhas das linhas associada ao método das posições de faltas para a previsão estocástica dos afundamentos de tensão permite uma boa visualização da situação do SEP quando acometido por eventos com variações na tensão. Entretanto, como já mencionado neste capítulo, isto é válido apenas quando são considerados longos períodos de análises, como o período de um ou mais anos (Espinosa-Juarez *et al.*, 2009). Para análises em que se pretende observar períodos mais curtos, ou para investigar a situação atual do sistema, este tipo de estudo não é eficiente. Logo, se a intenção é averiguar a ocorrência das variações de tensão em um sistema elétrico de forma contínua, deve-se realizar o monitoramento do sistema direcionado para este aspecto.

Os trabalhos que utilizam previsão estocástica para caracterizar a intensidade e quantidade dos afundamentos de tensão aos quais um SEP pode estar submetido, motivaram o desenvolvimento de modelos de otimização para alocação de monitores de QEE. Olguin e Bollen (2003a) propuseram minimizar o custo total do monitoramento das VTCD. A cobertura total do sistema frente a ocorrência destes eventos é garantida pelo uso de restrições provenientes da matriz de tensões remanescentes durante as situações de falta aplicadas, obtidas pelo método das posições de falta. Inicialmente, aplica-se o método das posições de falta para construir a MTDF. Em seguida, um limiar é estabelecido para indicar abaixo de qual valor de tensão

o monitor de qualidade de energia deve passar a registrar as ocorrências. Posteriormente, constrói-se a matriz de cobertura com as mesmas dimensões da matriz das tensões remanescentes, atribuindo-se o valor 1 às posições da matriz de cobertura correspondentes a valores abaixo do limiar, e o valor 0 às posições com valores acima do limiar. A matriz apresentada na Equação (2.4) ilustra uma Matriz de Cobertura (MC), a qual foi obtida considerando-se a matriz das tensões remanescentes da Equação (2.3) e um limiar de $0,9p.u.$

$$\text{Matriz de Cobertura (MC)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Esta modelagem resulta em um problema de programação linear inteiro com variáveis binárias, formulado como apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f(x) = \sum x_i \\ &\text{sujeito à: } \mathbf{MC} \cdot \mathbf{X} \geq \mathbf{b}; \end{aligned} \quad (2.5)$$

sendo que o vetor de existência $\mathbf{X}$ é um vetor binário de dimensão $nx1$, em que cada posição indica a instalação ou não de um monitor de QEE em um determinado barramento, $\mathbf{MC}$ é a matriz de cobertura e $\mathbf{b}$ é um vetor de "uns" com dimensão de $1xn$.

O problema foi resolvido por Olguin e Bollen (2003a) com o algoritmo de *Branch and Bound* (B&B) possibilitando encontrar o menor número de monitores para observar as VTCD, considerando o limiar estabelecido.

Olguin (2005) relata a possibilidade de utilização de um arranjo de monitores, obtido como proposto por Olguin e Bollen (2003a), em conjunto com a avaliação estocástica proposta por Olguin e Bollen (2003b). Esta abordagem conjunta permitiria um melhor entendimento do comportamento do SEP frente aos distúrbios, e a previsão estocástica mais precisa dos índices de afundamentos esperados nos diversos pontos não monitorados em virtude das medidas realizadas pelos monitores já instalados. Outra possibilidade é a utilização dos dados obtidos com os monitores instalados para realizar uma estimação de estados dos afundamentos de tensão nas barras não monitoradas (Espinosa-Juarez e Hernandez, 2007).

Olguin *et al.* (2006) repetem os mesmo passos seguidos por Olguin e Bollen (2003a), entretanto, percebem que pode existir mais de uma solução com o mesmo número de monitores para o problema de otimização combinatória modelado. Notou-se que, dentre as soluções com o menor número de monitores que possibilitam a cobertura de todos os eventos de VTCD, existem arranjos de monitores que são melhores que outros, devido à redundância das medidas. Os autores optaram então, por, após resolver o problema conforme modelado por Olguin e Bollen (2003a), aplicar Algoritmos Genéticos (AG) para determinar a melhor combinação de monitores para o número mínimo já determinado. Com a utilização de AG para solucionar este segundo problema de otimização combinatória, que consiste em determinar o arranjo com o número mínimo de monitores que fornece a melhor redundância, percebe-se a preocupação dos autores com outro critério que influencia no problema de alocação dos monitores, a qualidade da solução apontada.

Os autores Olguin *et al.* (2006) concluem afirmando que várias melhorias podem ser adicionadas à sua proposta, como, por exemplo, considerar a ocorrência de curtos-circuitos também nas linhas para determinar a matriz de restrições e considerar outros tipos de faltas. Neste sentido, vários trabalhos surgiram complementando a modelagem proposta (Salim e Nor, 2008, 2010; Espinosa-Juarez *et al.*, 2009; Almeida e Kagan, 2009, 2011; Espinosa-Juarez *et al.*, 2009; Cebrian *et al.*, 2010; Haghbin e Farjah, 2009).

Espinosa-Juarez *et al.* (2009) comentam que a proposta de Olguin *et al.* (2006) não garante uma boa observabilidade frente as VTCD, uma vez que foi utilizado um número reduzido de posições de falta (apenas faltas nas barras) e simulado somente um tipo de falta. Espinosa-Juarez *et al.* (2009) simularam faltas distribuídas ao longo das linhas, além de curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos, no intuito de prover uma maior observabilidade. As restrições foram encontradas com o algoritmo de estimação de afundamentos de tensão proposto por Espinosa-Juarez e Hernandez (2007). As restrições obrigam que seja possível estimar o afundamento de tensão em qualquer ponto do sistema para qualquer tipo de falta que ocorra, respeitando o limiar adotado na montagem da matriz de tensões remanescentes.

Salim e Nor (2008, 2010), consideram a possibilidade das ocorrências de VTCD em cada barra do sistema serem monitoradas por até 3 monitores instalados em locais diferentes. Observa-se que a solução proposta por Salim e Nor (2008, 2010) possui um custo maior que o obtido com o modelo de Olguin e Bollen (2003a). Entretanto, a solução apresentada ainda tem um custo menor que a apresentada por modelos que visam monitorar completamente o SEP em estado

de regime permanente, como o proposto por Eldery *et al.* (2006). Continuando a comparação com o trabalho de Olguin e Bollen (2003a), nota-se que a proposta de Salim e Nor (2008, 2010) permite que as VTCD continuem sendo monitoradas, ou estimadas, para as barras não monitoradas, mesmo se a comunicação com um dos monitores instalados for perdida, devido à redundância embutida na sua modelagem. Esta abordagem, na qual se busca garantir uma certa redundância, é bastante interessante, principalmente para monitorar sistemas com cargas críticas.

Espinosa-Juarez *et al.* (2009) utilizou a Busca Tabu para solucionar o problema como modelado por Espinosa-Juarez *et al.* (2009), acrescentando no entanto, considerações referentes ao estado de operação do sistema antes da ocorrência das VTCD. Os autores colocam que, como o estado de operação anterior à ocorrência das VTCD tem influência na estimação dos afundamentos de tensão nos pontos não monitorados, a consideração deste fator também influencia na alocação otimizada dos monitores.

Almeida e Kagan (2009, 2011), aplicaram AG com uma função de avaliação *Fuzzy* para computar a função objetivo. Nesses trabalhos, as restrições da matriz de cobertura, obtidas pelo método das posições de falta, garantem o monitoramento dos afundamentos de tensão da mesma forma que nos demais trabalhos citados. Entretanto, a avaliação da função objetivo por uma função *Fuzzy* minimiza o número de monitores instalados e tenta manter a homogeneidade na redundância das VTCD monitoradas. Portanto, percebe-se claramente que esta é uma proposta multicritério, na qual a avaliação por uma função *Fuzzy* simula a presença do analista para ponderar os critérios avaliados e decidir sobre a melhor solução.

Cebrian *et al.* (2010) aplicam o método das posições de faltas em conjunto com o Método de Monte Carlo para construir uma matriz de restrições com as situações mais representativas para um sistema de distribuição. Em seguida, uma função de avaliação *Fuzzy* aplicada a um AG determinou a melhor solução para a instalação dos monitores de QEE. Nesta abordagem priorizou-se uma maior cobertura dos componentes do sistema de distribuição em detrimento da redundância das medidas.

Haghbin e Farjah (2009) utilizaram um AG em conjunto com um Sistema *Fuzzy* (SF) para determinar a alocação ótima dos monitores de QEE. Nesta proposta, o SF tem suas funções de pertinência modeladas para determinar quando um afundamento de tensão está dentro da área de cobertura de um determinado monitor. Observa-se que, com este modelo, é possível perceber qual combinação de monitores, com menor custo, oferece uma melhor cobertura aos

afundamentos de tensão. Novamente o SF faz o papel de decisor em um modelo que avalia mais de um critério.

Surgiram também outras propostas que utilizavam o método da posição de falta para montar suas restrições. No entanto, estas estavam voltadas para otimizar outros aspectos, como, por exemplo, minimizar os erros para a localização de faltas no SEP (Guerra e Kagan, 2009; Avendano-Mora *et al.*, 2010). Sabe-se que curtos-circuitos ocorridos em dois pontos distintos do sistema elétrico (pontos *A* e *B*) podem resultar na mesma tensão remanescente em um terceiro ponto *C* do SEP. Se o valor da tensão registrado por um monitor alocado no ponto *C* for utilizado para estimar a tensão remanescente em outro local, o valor estimado pode conter um erro significativo. Isto ocorre porque a tensão remanescente no ponto estimado pode ter uma amplitude diferente em função do curto-circuito ter ocorrido no ponto *A* ou no ponto *B*. Deste modo, Avendano-Mora *et al.* (2010) colocam que adotar a precisão da localização de falta como função de avaliação é uma excelente alternativa, uma vez que, se for possível estimar com uma boa precisão a localização da falta ocorrida, o problema com possíveis erros na estimação dos afundamento nos pontos não monitorado seria minimizado.

Guerra e Kagan (2009) abordaram o problema de alocação dos monitores para a localização de falta com o emprego de AG. Em sua abordagem os autores codificaram o indivíduo de forma que fosse possível identificar, além da localização da falta, o tipo de falta que ocorreu e a impedância de falta associada ao evento. Segundo os autores, determinando todas estas informações de forma correta, a estimação das tensões em pontos não monitorados, mediante monitores alocados com esta metodologia, será bastante verossímil aos valores corretos.

Pelos trabalhos reportados até o momento, percebe-se que vários critérios podem ser avaliados para o estabelecimento de um plano de monitoramento voltado aos afundamentos de tensão. Apesar da eficiência demonstrada por estes métodos baseados na obtenção da matriz de tensões remanescentes, todos eles padecem do mesmo ponto fraco. A matriz de cobertura é construída a partir da matriz das tensões remanescentes (MTDF), e para tanto, precisa-se estabelecer um limiar, abaixo do qual o monitor alocado deve ser sensibilizado para registrar a ocorrência dos eventos.

A escolha de um limiar ideal não é uma tarefa fácil, pois se o limiar escolhido for um valor baixo, variações de tensão ocorridas em pontos distantes das localizações dos monitores podem não provocar uma queda de tensão suficiente (abaixo do limiar) nos pontos de monitoramento para disparar o registro das ocorrências. Nestas situações, várias ocorrências não seriam regis-

tradas, levando a uma visão enganosa a respeito do desempenho do sistema frente às variações de tensão, principalmente para os locais eletricamente mais distantes dos pontos de monitoramento. Para contornar esta situação, a quantidade de monitores requerida para atender as restrições aumenta, o que eleva os custos do monitoramento. Uma alternativa para solucionar este tipo de problema seria a adoção de um limiar de disparo com valor mais alto. Entretanto, à medida que o valor do limiar é incrementado, o sistema de monitoramento torna-se mais sensível às variações de tensão, até mesmo àquelas que não configuram um real problema de QEE.

Modelos de otimização construídos com base na topologia do sistema são boas opções caso se deseje monitorar variações de tensão, mesmo que mínimas, ou eventos que ocorram em regime permanente. Geralmente, modelos com esta abordagem fornecem soluções com custo mais elevado que as soluções fornecidas por modelos voltados ao monitoramento das VTCD. Por outro lado, as soluções obtidas com modelos topológicos, devido às restrições que são impostas, permitem medir ou calcular todas as variáveis de estado (tensões nas barras e correntes nas linhas) do SEP, proporcionando um monitoramento em regime permanente. Os trabalhos apresentados por Eldery *et al.* (2004, 2006) e por Reis *et al.* (2008) seguem esta linha de raciocínio e são direcionados para sistemas de transmissão.

A formulação apresentada por Eldery *et al.* (2004, 2006) objetiva minimizar o custo total do monitoramento considerando que todas as variáveis de estado possam ser medidas ou calculadas a partir dos monitores instalados. Nessa abordagem, apontam-se as barras que devem ser monitoradas, e nestas, devem ser medidas a tensão na barra e a corrente em cada linha. Os autores consideram a possibilidade do custo de instalação dos monitores em cada barra ser proporcional à quantidade de linhas que partem dela. Durante a apresentação dos resultados obtidos, os autores mencionam a possibilidade de existirem algumas soluções com o mesmo custo, mas que fornecem uma maior redundância de medidas. A redundância das variáveis medidas é desejável, já que com isso ocorrerá um aumento na confiabilidade. Sendo assim, é de grande valia identificar a solução com a maior redundância dentre as possíveis soluções de custo mínimo.

Reis *et al.* (2008) propuseram uma simplificação do modelo apresentado por Eldery *et al.* (2004, 2006). Com as simplificações propostas, o problema foi modelado como um Problema de Programação Linear (PPL). Levando em conta o fato de existir mais de uma solução com o mesmo custo, como citado por Eldery *et al.* (2006), Reis *et al.* (2008), realizam uma modificação

no algoritmo de B&B que permite encontrar todas as soluções possíveis de custo mínimo. Após encontrar todas as soluções de custo mínimo, os autores localizam aquela com a melhor redundância e apontam como solução ótima.

A metodologia proposta por Reis *et al.* (2008) apresenta um avanço em comparação ao apresentado por Eldery *et al.* (2006) por possibilitar encontrar o arranjo de menor custo e maior redundância, todavia, deve ser aplicada com certa atenção. Percebe-se o interesse em apontar o melhor arranjo de monitores com custo mínimo, entretanto, o fator de redundância só será avaliado após o conhecimento das soluções com o menor custo. A modificação proposta pelos autores no algoritmo B&B faz com que a árvore do B&B cresça consideravelmente, pois faz-se necessário encontrar todas as soluções com o custo mínimo, o que pode ocasionar um tempo maior para a resolução do problema, dificultando o processo de convergência, principalmente para sistemas de grande porte. Além disso, a quantidade de soluções com o custo mínimo, principalmente para sistemas de grande porte, pode ser exorbitante, implicando na necessidade de realizar uma busca muito custosa, ou outro processo de otimização, para se encontrar neste conjunto, o arranjo com a melhor redundância de medidas. Para sistemas de pequeno porte, com poucas variáveis, o custo computacional desta metodologia não chega a caracterizar um empecilho. Entretanto, na medida em que o número de variáveis aumenta, a metodologia apresentada pode não responder adequadamente.

Won e Moon (2008) defendem uma proposta baseada na topologia de um sistema de distribuição para a alocação ótima dos monitores de QEE. Nessa proposta o modelo de otimização busca alocar os monitores priorizando pontos de instalação de acordo com as regras propostas e por Won *et al.* (2006). Novamente, vários arranjos de monitores fornecem soluções com o mesmo custo, e, nesta proposta, os autores propõe escolher como o melhor arranjo aquele que apresente a menor ambiguidade topológica para o sistema de monitoramento.

Ibrahim *et al.* (2011) também apresentam uma abordagem baseada na topologia de sistemas de distribuição para a alocação dos monitores de QEE. Na proposta dos autores é utilizada a matriz de tensões remanescentes em conjunto com informações topológicas do sistema de distribuição para construir a matriz de cobertura do problema.

Além dos trabalhos discutidos nesta revisão existem várias outras propostas para a alocação dos monitores de QEE em sistemas elétricos. Isto mostra que, apesar de ser uma linha relativamente nova de pesquisa, já existe um grande interesse dos pesquisadores neste tema. Nos demais trabalhos consultados durante a revisão bibliográfica realizada, observou-se outros

aspectos que podem ser considerados para a modelagem deste problema, como, por exemplo:

- Alocação ótima de monitores para a localização de fontes de harmônicos (Muscas *et al.*, 2004, 2006, 2007; Hong e Chen, 2011);
- Alocação ótima de monitores para a localização de fontes de flutuações de tensão (*Flicker*) (Moaddabi *et al.*, 2008);
- Alocação ótima de monitores considerando o impacto da geração distribuída (Espinosa-Juarez *et al.*, 2009); e

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo, buscou-se realizar uma revisão bibliográfica com trabalhos que abrangem vários aspectos que podem ser considerados para o estabelecimento de um plano de monitoramento da QEE em SEPs. Uma ênfase maior foi dada aos trabalhos que abordavam a otimização do sistema de monitoramento para os eventos das variações de tensão de curta duração, em especial, aos afundamentos de tensão, e para trabalhos que consideravam a topologia dos SEPs para fornecer o melhor plano de monitoramento.

Mediante os vários trabalhos relatados, observou-se que para a obtenção de um sistema de monitoramento mais eficiente e robusto, vários aspectos devem ser considerados simultaneamente para otimizar a alocação dos monitores de QEE. Isto leva à possibilidade de caracterizar o problema de alocação de monitores de QEE em SEPs como um problema de otimização multiobjetivo. Cabe colocar que a proposta deste trabalho é modelar o problema da alocação de monitores de QEE considerando a topologia do sistema de distribuição e o monitoramento das VTCD.

Conforme será posteriormente apresentado e defendido no Capítulo 3, para a resolução do problema modelado nesta tese de doutorado, foi utilizado um algoritmo evolutivo multiobjetivo, o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com Tabelas (AEMT) (Delbem *et al.*, 2005).

Capítulo 3

Otimização Multiobjetivo e Algoritmos Aplicados

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados à otimização multi-objetivo, bem como a evolução dos Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (AEMO) ao longo dos anos. Em seguida serão apresentados conceitos básicos relacionados aos AG e ao AEMT.

3.1 Otimização Multiobjetivo: Aspectos Conceituais

Problemas práticos do mundo real exigem tomadas de decisão que envolvem a análise simultânea de vários critérios concorrentes. Em determinadas situações podem existir várias soluções que atendam aos critérios analisados sem, contudo, ser possível afirmar qual é a melhor em comparação às demais. Sendo assim, quando o processo de escolha envolver critérios concorrentes, a priorização de um critério acarretará prejuízo em relação aos demais critérios, e a tomada de decisão envolverá a análise do custo/benefício relativo à escolha de uma solução.

Um exemplo clássico deste tipo de situação é a decisão sobre a aquisição de um automóvel (Deb, 2001). Neste tipo de situação, supõem-se o interesse do comprador por um veículo de baixo custo com um alto conforto. Para o exemplo, após uma pesquisa minuciosa, o interessado chegou ao conjunto de opções da Tabela 3.1.

Para facilitar a análise das opções, os dados podem ser postos em um plano cartesiano representando a relação Custo×Conforto, como visualizado na Figura 3.1.

Tabela 3.1: Opções de automóveis para aquisição. Nesta tabela o conforto representa o percentual de satisfação pessoal com a aquisição do veículo.

Opção	Custo $\times 10^3$	Conforto %	Opção	Custo $\times 10^3$	Conforto %
Carro A	20	25	Carro D	70	90
Carro B	30	50	Carro E	60	85
Carro C	50	85	Carro F	40	30

Figura 3.1: Custo *versus* Conforto das opções de automóveis disponíveis para compra.

Comparando a opção E com a opção F, o comprador não tem como apontar qual é a melhor, pois a opção E tem maior conforto que a F. Entretanto, seu custo é bem maior. Já ao comparar a opção E com a opção C, é possível descartar E, pois esta possui o mesmo conforto que C por um preço maior. Em seguida, ao comparar a opção F à opção A, novamente o comprador não pode inferir qual é a melhor opção, pois o carro A é mais barato que o carro F. Contudo, o conforto proporcionado por A, também é menor que o conforto obtido com F. Agora, ao comparar o carro F ao carro B, é possível descartar F, pois este custa mais que B e oferece um conforto menor. Após fazer esta análise comparativa entre todas as opções, verifica-se que não há como responder qual das seguintes opções é melhor: A, B, C ou D. Pois ao comparar estas quatro opções, verifica-se que quando uma tem maior conforto, seu custo também é maior. Já, quando uma destas soluções tem conforto menor, seu custo também é menor.

A partir deste exemplo, é possível entender o conceito de dominância. Uma solução domina outra se e somente se é melhor em, pelo menos, um objetivo, e não é pior em todos os outros (Bosman e Thierens, 2002). No exemplo da compra dos carros, a opção C domina a opção E, pois C possui melhor custo e não possui pior conforto que E. Já a opção F é dominada pela solução B, pois B tem melhor custo e melhor conforto que F. Neste exemplo, as opções E e F formam o conjunto de soluções dominadas, enquanto as opções A, B, C e D não são dominadas por nenhuma outra solução, logo, formam o conjunto de soluções não dominadas. É interessante notar que podem ser definidos níveis de dominância, em que o segundo nível de dominância seria o conjunto de todas as soluções não dominadas pelas demais soluções,

desconsiderando as soluções que pertencem ao primeiro nível de dominância. Generalizando, o nível de dominância N é composto por todas as soluções não dominadas pelas demais soluções, desconsiderando as soluções presentes nos $N - 1$ níveis de dominância anteriores. A Figura 3.2 ilustra um conjunto de possíveis soluções para um problema hipotético com objetivos concorrentes. Nessa figura, observa-se as soluções divididas em 3 níveis de dominância, que configuram fronteiras de dominância para cada nível.

Figura 3.2: Ilustração das fronteiras de Pareto de três níveis de dominância.

Com base no exemplo citado, em função das opções disponíveis para a compra de automóveis, apresenta-se então a diferença conceitual entre um problema multiobjetivo, e um problema mono-objetivo. A otimização multiobjetivo difere da otimização mono-objetivo porque busca soluções que sejam ótimas para os vários objetivos simultaneamente (Pelikan *et al.*, 2005). Ainda neste contexto, outras duas definições importantes são (Bosman e Thierens, 2002):

- Conjunto de Pareto ótimo: conjunto de todas as soluções não dominadas presentes no espaço de busca;
- Fronteira de Pareto: conjunto dos valores das funções objetivo de todas as soluções presentes no conjunto de Pareto.

No exemplo citado o conjunto de Pareto é dado pelas soluções (A, B, C, D). A fronteira de Pareto é dada pelo mesmo conjunto, considerando os valores das funções objetivos de cada

solução. A fronteira de Pareto descreve uma curva no espaço das funções objetivo, como pode ser observado na Figura 3.1.

A otimização multiobjetivo consiste em determinar uma boa representação para o conjunto de Pareto ótimo, com soluções diversificadas e bem distribuídas na fronteira de Pareto (Coello, 2000). A representação de problemas da forma multiobjetivo apresenta vantagem com relação aos modelos mono-objetivo, pois considera vários aspectos de um problema.

As técnicas de otimização tradicionais geralmente abordam a otimização multiobjetivo por meio do processo de escalarização. O processo de escalarização consiste na transformação do problema multiobjetivo em um problema de otimização de uma função escalar substituta (chamada de função escalarizante, ou função de escalarização), cuja solução ótima é também uma solução não dominada do problema original (Kuk, 2002). Os três principais tipos de funções de escalarização utilizados consistem:

- Na otimização de uma das funções objetivo restringindo as outras;
- Na soma ponderada das funções objetivo ou método das ponderações; e
- Em uma métrica ou distância a um ponto de referência ou ponto ideal.

A soma ponderada das funções objetivo, no qual a função escalarizante é a soma ponderada das funções objetivo, é uma das alternativas mais utilizadas pelos métodos tradicionais de otimização para converter o problema multiobjetivo em um problema com único objetivo. Porém, esta alternativa apresenta vários inconvenientes, tais como: necessidade e dificuldade para estabelecer um vetor de pesos ideal; ausência de soluções ótimas em regiões não convexas do espaço dos objetivos; e dificuldade para homogeneizar quantidades diferentes (como, por exemplo: qualidade, custo e tempo) para serem avaliadas como uma unidade de medida comum em um único objetivo (Eskandari e Geiger, 2009).

3.2 Algoritmos Evolutivos e a Otimização Multiobjetivo

Para se sobrepor aos inconvenientes anteriormente citados nas técnicas tradicionais de otimização multiobjetivo, várias técnicas multiobjetivo baseadas em Algoritmos Evolutivos (AE) vem sendo propostas ao longo dos anos (Coello, 2000). As características inerentes dos algoritmos evolutivos proporcionam a estes capacidade de paralelização da busca por soluções

ótimas, com a exploração de várias regiões do espaço de busca ao mesmo tempo (Back e Schwefel, 1996). Os AE também tem facilidade em lidar com múltiplos objetivos e boa capacidade para fugir de ótimos locais. Por estes motivos, os AE tem uma maior capacidade de encontrar um bom número de soluções da fronteira de Pareto (Sastry *et al.*, 2005).

Como reportado por Coello (2000), no final da década de 80 e no início da década de 90, vários trabalhos propondo resolução de modelos multiobjetivos com a aplicação de AE, principalmente os AG, foram desenvolvidos. Contudo, estes trabalhos não exploravam plenamente as características vantajosas dos AE para resolução de problemas multiobjetivos, pois estas simplesmente aplicavam os AE com a função objetivo composta por uma função agregação, ou para minimizar um objetivo considerando os outros como restrições, ou buscando minimizar a distância a um ponto considerado ideal. Coello (2000) chega a citar tais abordagens como ingênuas, pois apenas replicavam as abordagens tradicionais com utilização de AE. Estas abordagens, em conjunto com outras, como o *Vector Evaluated Genetic Algorithm* *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (VEGA) (Schaffer, 1985), formam o conjunto de abordagens classificadas como de primeira geração dos AEMO, que não incorporavam diretamente o conceito de fronteira de Pareto. As principais vantagens destes métodos são a simplicidade e a facilidade de implementação, contudo enfrentavam os mesmos problemas que as técnicas tradicionais.

O VEGA divide a população em subgrupos, considerando a aptidão de cada indivíduo separadamente para cada objetivo, e em seguida aplica os operadores tradicionais dos AG. Esta abordagem não possuía um mecanismo explícito para manter a diversidade da fronteira de Pareto, e não garantia que a solução era composta por um vetor de soluções não dominadas.

Para tentar corrigir os problemas apresentados pelo VEGA foram propostos vários algoritmos, ainda considerados de primeira geração, que incorporavam diretamente o conceito de fronteira de Pareto nos procedimentos de seleção (Coello, 2000). Estas abordagens empregavam alguma técnica para ranquear os indivíduos, ou seja, dividir a população em níveis de dominância, além de técnicas para manter a diversidade da população. Nestas abordagens, indivíduos em um melhor nível de dominância são considerados mais aptos, tendo maiores chances de reprodução. Dentre os algoritmos de primeira geração que incorporavam diretamente o conceito de fronteira de Pareto se destacam: o *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA) (Fonseca e Fleming, 1993) e o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) (Srinivas e Deb, 1994).

No MOGA o nível de dominância de um indivíduo p era computado considerando o número de indivíduos que o dominava (NID), segundo a expressão $N(p) = 1 + NID$. Dessa forma todos os

indivíduos não-dominados pertenciam ao nível 1, e os demais seguiam a expressão apresentada. Já a ideia básica do NSGA era encontrar um conjunto de indivíduos não-dominados em relação ao restante da população, e apontar este conjunto como o de nível de dominância mais alto. Em seguida repetir o mesmo procedimento com o restante da população, separando-a em vários níveis de não-dominância.

No início dos anos 2000, foram desenvolvidos os primeiros AEMO considerados de segunda geração. A ênfase destes algoritmos era melhorar a eficiência dos algoritmos de primeira geração baseados no conceito de fronteira de Pareto. A melhoria buscada consistia em diminuir o custo computacional para ranquear os indivíduos, e também em melhorar a diversidade da população ao longo dos níveis de dominância estabelecidos (Deb *et al.*, 2002). Dentre os algoritmos de segunda geração destacam-se os seguintes: o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm II* (SPEA-II) (Zitzler *et al.*, 2001), e *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II* (NSGA-II) (Deb *et al.*, 2002).

O SPEA-II utiliza um procedimento semelhante ao MOGA para proceder ao ranqueamento dos indivíduos. Contudo, para determinar a “força” de um indivíduo, o SPEA-II considera tanto o número de indivíduos que o dominam, quanto a quantidade de indivíduos por ele dominados. Esta estratégia em conjunto com outras melhorias possibilitam que o SPEA-II forneça soluções bem distribuídas ao longo da fronteira de Pareto. Já o NSGA-II realiza procedimento de ranqueamento seguindo a mesma lógica que o seu predecessor, contudo, além deste ser mais eficiente computacionalmente falando, para prover a diversidade, incorpora alguns conceitos novos, como a distância de aglomeração (*crowding distance*), que favorece que as soluções sejam mais bem distribuídas ao longo da fronteira de Pareto.

O NSGA-II foi um dos AEMO mais bem-sucedidos, e, provavelmente, o mais utilizado dos desenvolvidos até hoje, sendo largamente empregado em uma vasta coleção de problemas. Contudo, algumas pesquisas mostram que o NSGA-II não se comporta bem quando aplicado à problemas com muitos objetivos (Adra e Fleming, 2009; Ishibuchi *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2010; Adra e Fleming, 2011). Problemas com mais de três objetivos são considerados como problemas com muitos objetivos e, para esta classe de problemas, têm-se percebido que o mecanismo do *crowding distance* do NSGA-II não é suficiente para manter a diversidade das soluções na fronteira de Pareto, ou mesmo para fornecer a fronteira de Pareto com as soluções mais eficientes.

Diante da dificuldade do NSGA-II em considerar muitos objetivos, alguns trabalhos apon-

tam algoritmos que se mostram mais eficientes para esta classe de problemas (Adra e Fleming, 2009; Ishibuchi *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2010; Adra e Fleming, 2011). Dentre tais algoritmos, destaca-se o AEMT (Delbem *et al.*, 2005), um algoritmo fortemente elitista baseado em pequenas subpopulações para cada objetivo, e para objetivos compostos para a soma ponderada dos demais (Santos *et al.*, 2010). O AEMT conta também com subpopulações para os três primeiros níveis de dominância, incorporando os conceitos de fronteira de Pareto e de distância de aglomeração para prover soluções bem distribuídas.

Importa destacar que, como pode ser percebido ao longo desta seção, a principal diferença entre os diversos algoritmos evolutivos multiobjetivo propostos na literatura está no operador de seleção destes algoritmos. É durante a seleção que se evidencia como as soluções são comparadas e é definido qual é a melhor delas. É também no procedimento de seleção que é importante a utilização dos mecanismos para manutenção da diversidade das soluções, e que permitam que a fronteira de Pareto possua soluções bem distribuídas por toda sua extensão.

Neste trabalho foi utilizado o AEMT, que será explicado na Seção 3.5. Antes, faz-se uma breve revisão sobre Algoritmos Genéticos (AG) para apresentar os principais conceitos relacionados e seus operadores, que também são utilizados no AEMT. Em seguida, apresenta-se o NSGA-II, com objetivo de detalhar o procedimento de ranqueamento da população em níveis de dominância e o procedimento de cálculo da distância de aglomeração, pois ambos também são utilizados no AEMT.

3.3 Algoritmos Genéticos

Os AG são métodos de otimização e busca baseados no princípio da seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais apto que foi definida por Charles Darwin em 1859 (Goldberg, 1989). No fluxograma mostrado pela Figura 3.3 é apresentado um esquema simplificado de um AG.

Em um AG, cada indivíduo de uma população irá caracterizar uma possível solução para o problema. Em um primeiro passo, a população de indivíduos é iniciada de forma aleatória, sendo geralmente caracterizada por uma distribuição uniforme. Em seguida cada indivíduo será avaliado por uma função de aptidão (ou função de *fitness*), que mensura quão boa é a solução. Após todos os indivíduos serem avaliados, realiza-se o procedimento de seleção, no qual os indivíduos mais aptos são selecionados para dar origem à próxima geração. Desta

Figura 3.3: Fluxograma básico de um AG.

forma, os indivíduos mais aptos terão suas características transmitidas às próximas gerações.

Para decidir se dois indivíduos selecionados farão cruzamento, ou não, utiliza-se um parâmetro denominado taxa de cruzamento, que informa a chance de ocorrer cruzamento. Caso um par de indivíduos não realize o cruzamento, os dois indivíduos terão uma cópia direta dos seus códigos genéticos na população da nova geração. Em caso contrário, ocorrerá um cruzamento entre os indivíduos selecionados. Após a etapa de cruzamento, sobre a nova população gerada, aplica-se o operador de mutação, obedecendo a um parâmetro, denominado taxa de mutação, que determina a chance de um indivíduo sofrer mutação. Finalmente a nova população gerada substitui a população antiga e é verificado se os critérios de parada do algoritmo foram atingidos.

3.4 *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*

O algoritmo NSGA-II, proposto por Deb *et al.* (2002), aplica os conceitos de dominância e de distância de aglomeração para realizar o procedimento de seleção, e incorpora um mecanismo de elitismo ao processo de substituição da antiga pela nova população.

Neste algoritmo, a população é dividida em níveis de dominância, como explicado anteriormente e exemplificado na Figura 3.2. Após a divisão da população em níveis de dominância, é calculada a distância de aglomeração de todas as soluções da fronteira de Pareto de cada nível. A distância de aglomeração assume um valor infinito nas extremidades da fronteira de Pareto de um determinado nível de dominância, e para as demais soluções é dada pelo perímetro do

cuboide formado pelas suas soluções vizinhas. Esta medida informa quão isolada está uma solução. Com a intenção de manter uma boa diversidade e distribuição das soluções na fronteira de Pareto, as soluções com maior distância de aglomeração são as melhores dentro do seu nível de dominância. A Figura 3.4 exemplifica o cálculo dos valores de distância de aglomeração para as extremidades e para uma solução i .

Figura 3.4: Cálculo da distância de aglomeração.

Durante o procedimento de seleção, dois indivíduos são comparados pelo nível de dominância. Os indivíduos da fronteira de primeiro nível de dominância são melhores que os da fronteira de segundo nível, que são melhores que os do terceiro nível, e assim sucessivamente. Desta forma, caso um indivíduo A pertença a uma fronteira de nível menor que o indivíduo B , então A é melhor que B . No caso de dois indivíduos pertencerem a uma fronteira de mesmo nível, o melhor é aquele que tem a maior distância de aglomeração. O operador de seleção a ser utilizado não é alterado, apenas a maneira de comparar as soluções é que passa a ser feita utilizando os níveis de dominância e a distância de aglomeração. Na proposição original do algoritmo é utilizado o torneio, mas, por exemplo, poderia ser usado o truncamento. A Figura 3.5 é do procedimento básico do NSGA-II, que será explanado por completo a seguir.

O primeiro passo do NSGA-II é a inicialização de uma população inicial ($P_{t=0}$), aleatória com tamanho N . Em seguida, aplica-se os operadores de seleção, como descrito anteriormente, cruzamento e mutação, para gerar uma população filha, ($Q_{t=0}$) também de tamanho N . Uma população auxiliar, com tamanho $2N$, é formada com a junção das duas populações e aplica-se então o elitismo, segundo o qual somente os N melhores indivíduos da população resultante serão preservados. Para a aplicação do elitismo, separa-se a população auxiliar por níveis de dominância, e em seguida, os indivíduos da fronteira de cada nível são inseridos, seguindo uma ordem crescente dos níveis na nova população P_{t+1} , até que esta atinja o tamanho N . Caso a

Figura 3.5: Procedimento de seleção do NSGA-II apresentado por Deb (2001).

fronteira do último nível a ser inserido tenha mais indivíduos que o necessário para completar a nova população de tamanho N , realiza-se a ordenação dos indivíduos desse nível por distância de aglomeração. Somente os melhores indivíduos deste último nível, suficientes para completar o tamanho da nova população, serão inseridos. O restante dos indivíduos do último nível serão descartados, juntamente com o restante dos indivíduos que não foram inseridos na nova população. Sobre a nova população P_{t+1} é feita a seleção, cruzamento e mutação para que esta dê origem a sua prole, Q_{t+1} . O processo continua até que sejam atingidos os critérios de parada. Ao final do algoritmo, os indivíduos do primeiro nível de dominância representam a solução do problema.

3.5 Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com Tabelas - AEMT

O AEMT é um algoritmo evolutivo multiobjetivo fortemente elitista, e foi utilizado neste trabalho com algumas adaptações em relação ao algoritmo original desenvolvido por Delbem *et al.* (2005). A motivação para o seu desenvolvimento foi produzir um algoritmo que permitisse o mapeamento de regiões promissoras no espaço dos objetivos onde, provavelmente, são encontradas as soluções pertencentes à fronteira de Pareto. Exemplos de regiões que podem ser consideradas como promissoras são: as melhores soluções de cada objetivo individualmente, e algumas combinações lineares destas soluções.

Com base nestas ideias, o AEMT apresenta pequenas subpopulações, denominadas *tabelas*, que agrupam os melhores indivíduos de cada objetivo considerado separadamente. Podem existir também subpopulações que agrupam os melhores indivíduos segundo uma pondera-

ção de dois ou mais objetivos. As subpopulações devem ser bem pequenas para realmente agrupar só os melhores indivíduos de cada objetivo. Na proposição original e neste trabalho, as subpopulações tem um tamanho de 5. Os indivíduos são incluídos nas subpopulações até que seu tamanho esteja completo. Após estarem completas, novos indivíduos são inseridos em uma subpopulação somente se tiverem *fitness*, para a função objetivo desta tabela, superior ao de um indivíduo já presente nela. Neste caso, o pior indivíduo presente na subpopulação é descartado. Não existe restrições para um mesmo indivíduo estar presente em mais de uma subpopulação.

De modo a evitar uma convergência prematura em problemas combinatoriais de grande porte, e para permitir uma maior diversidade, com soluções bem distribuídas na fronteira de Pareto, o AEMT emprega o conceito de dominância. Para tanto, são criadas, também, três subpopulações para armazenar os indivíduos da fronteiras dos três primeiros níveis de dominância. Nestas subpopulações os indivíduos são inseridos por dominância. Portanto, um novo indivíduo será inserido na subpopulação de um determinado nível de dominância se e somente se não for dominado por nenhum indivíduo desta subpopulação. Caso o indivíduo inserido domine algum indivíduo presente na subpopulação, este será retirado da subpopulação e inserido na subpopulação do próximo nível de dominância. Caso um indivíduo seja retirado da subpopulação do terceiro nível de dominância este será descartado.

Neste algoritmo a seleção passa a ser guiada pela escolha das subpopulações. Durante a seleção, escolhe-se aleatoriamente uma tabela, e, em seguida, um indivíduo pertencente a ela. Caso seja escolhida uma subpopulação que represente os objetivos, um indivíduo é selecionado aleatoriamente desta população. No caso de ser escolhida uma subpopulação que represente a fronteira de um determinado nível de dominância, seleciona-se um indivíduo por meio de torneio, considerando as distâncias de aglomeração como critério. A aplicação deste torneio é a principal modificação em relação ao algoritmo originalmente proposto. A Figura 3.6 ilustra o procedimento de seleção do AEMT, uma vez que este é o procedimento que difere o AEMT de um algoritmo evolutivo convencional. As demais etapas de um algoritmo evolutivo, como cruzamento e mutação, são semelhantes ao descrito anteriormente para um AG simples. O algoritmo do AEMT será detalhado por completo a seguir.

Uma população inicial $P_{t=0}$ com tamanho N é gerada de forma aleatória. Em seguida os indivíduos são avaliados e se verifica quais serão inseridos nas subpopulações. Após todos os indivíduos serem avaliados, e as subpopulações atualizadas, realiza-se o processo de seleção

Figura 3.6: Procedimento de seleção do algoritmo AEMT.

como descrito anteriormente. Os indivíduos selecionados realizam cruzamento e mutação, dando origem à nova população P_{t+1} . A nova população, P_{t+1} , será avaliada e as subpopulações atualizadas. O algoritmo prossegue até serem atingidos os critérios de parada. Ao final do algoritmo, a subpopulação que armazena os indivíduos do primeiro nível de dominância representa a solução do problema.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos sobre otimização multiobjetivo, destacando-se os benefícios que podem ser obtidos com este tipo de modelagem dos problemas de otimização. Comentou-se sobre as dificuldades que as técnicas tradicionais de otimização enfrentam para solucionar problemas com múltiplos objetivos, e foram destacadas as vantagens de utilização de algoritmos evolutivos para estes problemas. Em seguida foi apresentado um breve histórico dos AEMO, bem como o algoritmo NSGA-II, destacando-se a dificuldade destes em considerar problemas com muitos objetivos, e o AEMT, que foi utilizado neste trabalho por melhor responder a problemas com muitos objetivos.

No próximo capítulo, apresenta-se a modelagem proposta para o problema de alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição. A aplicação do AEMT para a resolução do problema proposto, também será abordada no próximo capítulo.

Capítulo 4

Modelagem Proposta para Alocação de Monitores de QEE em Sistemas de Distribuição de Energia

Este capítulo apresenta a modelagem multiobjetivo para o problema de alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição. A modelagem do problema de alocação de monitores em sistemas de distribuição considera aspectos da topologia do sistema, como a definição do alimentador principal, a existência de ramais e das cargas existentes em cada barra do sistema. Outro aspecto topológico relevante que é levado em consideração na modelagem é a ambiguidade topológica. Além das características topológicas, o modelo proposto considera também o monitoramento dos afundamentos de tensão. Todos estes pontos serão detalhados no decorrer deste capítulo. Contudo, inicialmente é importante apresentar a representação computacional adotada para os SDs.

4.1 Representação Computacional dos Sistemas de Distribuição

Os SDs radiais podem ser vistos como árvores de grafos, e representados computacionalmente por estruturas de dados baseadas em ponteiros (Bertziss, 1975). Esta representação será adotada neste trabalho por ser uma maneira bastante eficiente de representar um SEP (Won e Moon, 2008). Para ilustrar a representação em árvore de um SD, toma-se como exemplo o circuito com 6 barras apresentado na Figura 4.1. Neste caso, os componentes (linhas e cargas)

do circuito alimentador são os nós da árvore, sendo interconectados por meio de arcos (arestas orientadas) que denotam a hierarquia entre os elementos. Na Figura 4.2, tem-se a representação em árvore do circuito da Figura 4.1.

Figura 4.1: Representação unifilar de um circuito de distribuição com 6 barras.

Pela Figura 4.2 é possível observar o relacionamento hierárquico entre os nós, conforme anteriormente mencionado. Por exemplo, o nó L_1 é a raiz da árvore e está conectado aos nós L_2 , L_3 e L_4 , ou seja, esses três nós são filhos de L_1 . Em relação ao nó L_7 , este é considerado pai do nó L_{12} . Seguindo a mesma lógica, os nós L_6 , L_9 , L_{10} e L_{11} são descendentes de L_3 .

Figura 4.2: Representação em árvore do SD com 6 barras.

Para complementar a representação em árvore do SD, atribui-se a cada componente (cada nó da árvore) uma propriedade e uma numeração. As possíveis propriedades são: alimentador principal (ou tronco do Alimentador) (A_P), ramal (R_a) ou carga (L_o). Entre os ramais que derivam de um nó, a partir da raiz, determinou-se como um nó pertencente ao alimentador principal aquele com o maior número de descendentes. Após a definição do caminho do alimentador principal, as derivações de uma barra que não são cargas, ou que não pertençam ao tronco do alimentador, são consideradas ramais.

A numeração de cada nó da árvore é feita de acordo com o número da barra e a posição que o ramo ocupa na conexão com a barra. Assim, o componente c_{ij} , é o j -ésimo componente conectado a barra i . Para o circuito com 6 barras apresentado, a Figura 4.3 ilustra a árvore já com as propriedades e numerações atribuídas.

Figura 4.3: Representação em árvore do SD com 6 barras com as propriedades e numerações atribuídas.

4.2 Aspectos Considerados para a Alocação de Monitores de QEE

A escolha dos melhores pontos para o monitoramento da QEE em um SD é realizada com base no conhecimento especialista adquirido pelos engenheiros ao longo de anos de prática, considerando: a topologia do sistema, a forma como o evento de interesse se manifesta, e a forma como este se propaga no sistema. A seguir, enumera-se as práticas utilizadas neste trabalho para o monitoramento da QEE em SDs, considerando aspectos topológicos e a propagação dos afundamentos de tensão.

4.2.1 Aspectos relacionados à topologia do sistema

As regras topológicas adotadas são descritas a seguir, e indicadas na Figura 4.4, a título de exemplificação, considerando o circuito com 6 barras anteriormente apresentado.

Regra 1

Considera-se a Lei das Correntes de *Kirchhoff* (LCK). Se existem N linhas conectadas a uma barra, então existem N pontos possíveis de instalação para os monitores. Porém, somente é necessário conhecer as correntes de $(N-1)$ destas linhas, já que uma das linhas pode ser computada conhecendo-se todas as outras. A situação em que não se consegue determinar todas as correntes nas linhas conectadas a um determinado nó é tida como uma ambiguidade

topológica (Won *et al.*, 2006), e, por sua vez, as linhas que não podem ter suas grandezas monitoradas são ditas ambíguas. É fácil perceber que à medida que se diminui a ambiguidade de um sistema de distribuição, melhora-se o monitoramento deste sistema. No instante em que não houver mais ambiguidade em um circuito, é possível determinar todas as correntes nas linhas e tensões nas barras, o que permite um monitoramento completo da QEE.

Regra 2

É preponderante instalar monitores nas derivações das cargas, uma vez que a maioria dos prejuízos causados pelos problemas de QEE aparecem nas cargas dos consumidores, tornando-os importantes pontos de monitoramento. Por essa regra, deduz-se que as derivações das cargas devem ter preferência quando da aplicação da **Regra 1**.

Regra 3

Os monitores devem ser instalados em ramais com muitos descendentes, o que possibilita monitorar uma área maior. Com base nesta regra, os monitores tendem a ser instalados em pontos próximos a fonte de energia. Outra dedução advinda dessa regra é que, apesar dos ramais de carga terem preferência quando da aplicação da **Regra 1**, em determinadas situações, é mais conveniente instalar os monitores em ramais com muitos descendentes. Este critério permite obter uma visão geral da QEE em um maior número de consumidores, sem fornecer, no entanto, uma informação precisa a respeito de um determinado consumidor ou conjunto de cargas.

Regra 4

Os monitores devem ser instalados logo no início dos ramais, ou seja, após a saída da barra.

Figura 4.4: Aplicação das regras de posicionamento dos monitores.

É possível fazer algumas afirmações a respeito das regras apresentadas. Em primeiro lugar, observa-se que a **Regra 2** é fortemente contrária à **Regra 3**, pois quando opta-se por monitorar diretamente uma derivação de carga, como consequência, abdica-se de monitorar um ramal. Em relação à **Regra 1**, observa-se que ela não concorre com nenhuma das outras regras por hora apresentadas. A **Regra 1** permite uma composição com diferentes soluções que atendam a **Regra 2** ou a **Regra 3**, ou até mesmo diversas soluções com combinações que atendam parcialmente as duas. Já a **Regra 4** é simplesmente informativa, sugerindo o local de instalação dos monitores logo no início das linhas.

Cabe comentar que os aspectos aqui considerados para a alocação dos monitores, no que tange à topologia do sistema, são os mesmos definidos por Won *et al.* (2006) e implementados na metodologia proposta por Won e Moon (2008). Contudo, apesar de considerar os mesmos aspectos, a forma como estes são abordados neste trabalho e incorporados ao modelo de otimização proposto, diferem substancialmente da implementação proposta por Won e Moon (2008).

4.2.2 Aspectos relacionados aos afundamentos de tensão

Para a cobertura dos afundamentos de tensão, é importante observar as barras que permitam cobrir um maior número de afundamentos de tensão e que permitam a obtenção da redundância no monitoramento dos afundamentos. Um exemplo é apresentado considerando o sistema com 6 barras da Figura 4.5. Para dar sequência na explicação do exemplo, cabe lembrar a aplicação da **Regra 4**, apresentada na seção anterior, segundo a qual os monitores devem ser instalados logo após as barras no início dos ramais. Desta forma, o monitor instalado em qualquer ramal conectado a uma barra pode fornecer a informação da tensão naquela barra. Por exemplo, um monitor instalado na linha que vai da barra 2 para a barra 4 monitora a tensão na barra 2, assim como um monitor instalado na carga conectada à barra 2.

No sistema da Figura 4.5 é possível observar que um afundamento de tensão ocorrido na barra 3 pode sensibilizar monitores alocados na área circutada em azul, composta pela própria barra 3, e pelas barras 1 e 2. Já um afundamento de tensão ocorrido na barra 6 pode sensibilizar monitores alocados na área circutada em verde (barras 4, 5 e 6). Por sua vez, um afundamento de tensão ocorrido na barra 5, pode sensibilizar monitores alocados nas barras 5 e 4, conforme a área circutada em vermelho na Figura 4.5.

Figura 4.5: Propagação dos afundamentos de tensão no SD e sua relação com a alocação dos monitores.

Nas condições apresentadas, um monitor instalado na barra 5 permite perceber afundamentos ocorridos tanto na barra 5 quanto na barra 6. Caso mais um monitor seja instalado na barra 4, será obtida uma redundância na medida dos afundamentos de tensão ocorridos nas barras 5 e 6. Desta forma, se as informações do monitor da barra 5 forem perdidas, os afundamentos

nas barras 5 e 6 continuam sendo percebidos pelo monitor da barra 4. Contudo, os monitores instalados nas barras 4 e 5, apesar de possibilitarem redundância quanto ao monitoramento dos afundamentos nas barras 5 e 6, não possibilitam detecção de afundamentos ocorridos na barra 3. Os afundamentos ocorridos na barra 3 só serão percebidos por monitores instalados na barra 3, na 2 ou na barra 1.

Por meio deste exemplo foram apresentados os dois principais aspectos que devem ser observados quanto ao monitoramento dos afundamentos de tensão. Observa-se que a alocação dos monitores de QEE para monitoramento dos afundamentos de tensão está fortemente relacionada com a forma como estes se propagam pela rede. É importante possibilitar que os afundamentos que ocorram em todas as barras possam ser monitorados, e além disto, é interessante possibilitar que estes afundamentos sejam monitorados com redundância.

4.3 Modelo de Otimização Multiobjetivo Proposto para Alocação de Monitores de QEE em SDs

O modelo de otimização proposto neste trabalho, visa atender aos critérios topológicos e aos critérios relacionados ao monitoramento dos afundamentos de tensão, anteriormente descritos. É proposto um modelo que possibilite simultaneamente: minimizar o custo do monitoramento, maximizar o monitoramento das cargas, maximizar o monitoramento dos ramos, minimizar a ambiguidade topológica, minimizar a quantidade de afundamentos que não possam ser monitorados, e maximizar a redundância dos afundamentos monitorados. O modelo proposto será apresentado a seguir.

4.3.1 Vetor de existência

A indicação se um determinado componente c_{ij} (carga, alimentador principal, ou ramal) é monitorado diretamente, ou não, é realizada através do Vetor de existência (ou de alocação) x_{ij} , conforme a Equação (4.1).

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se existe monitor instalado no componente } c_{ij} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

4.3.2 O custo do monitoramento de um SD

O custo da instalação dos monitores em cada um dos possíveis pontos de monitoramento é determinado por:

$$p_{i_j} = \text{custo de instalação no componente } c_{i_j} . \quad (4.2)$$

Portanto, o custo do sistema de monitoramento é determinado pelo produto entre o vetor de alocação e o vetor de custos, como segue:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} p_{i_j} \cdot x_{i_j}, \quad (4.3)$$

em que n é a quantidade de barras do SD e N_i é o número de componentes conectados à barra i .

4.3.3 O monitoramento das cargas em um SD

A quantidade de carga existente em um componente c_{i_j} é designada l_{i_j} ou seja,

$$l_{i_j} = \text{Potência instalada do componente } c_{i_j} \text{ em kW} \quad (4.4)$$

Neste modelo, considerou-se o somatório das potências das cargas conectadas nas três fases de cada componente c_{i_j} como a carga total conectada ao componente. Caso o componente c_{i_j} seja um ramal, ou alimentador principal com carga modelada com parâmetros distribuídos pela linha, esta carga será considerada.

A potência instalada em um SD, monitorada por um dado arranjo de monitores é determinada por:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} l_{i_j} \cdot x_{i_j}, \quad (4.5)$$

4.3.4 Área monitorada a partir de um ramal c_{i_j}

A quantidade de descendentes de um componente c_{i_j} somada ao próprio componente, representa a extensão da área que pode ser monitorada a partir de um ramal c_{i_j} , e é determinada pela seguinte expressão:

$$d_{i_j} = \begin{cases} 0, \text{ se o componente } c_{i_j} \text{ não for ramal} \\ 1 + \sum_{k \in \Omega_{i_j}} N_k, \text{ caso contrário} \end{cases}, \quad (4.6)$$

sendo que N_k é o total de filhos do componente, e Ω_{i_j} é o conjunto de descendentes do componente c_{i_j} .

A extensão de um SD monitorada por um dado arranjo de monitores alocados em ramais é determinada pela Equação (4.7) a seguir:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} d_{i_j} \cdot x_{i_j}, \quad (4.7)$$

4.3.5 A ambiguidade topológica de um SD

Um componente j conectado a uma barra i (c_{i_j}) é ambíguo se não for possível determinar a sua corrente com um dado arranjo de monitores, conforme a Equação (4.8) a seguir:

$$a_{i_j}(\mathbf{X}, \mathbf{T}) = \begin{cases} 0, \text{ se o componente } c_{i_j} \text{ pode ter sua corrente determinada} \\ 1, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (4.8)$$

sendo que $\mathbf{X}$ é o vetor de alocação, que representa o arranjo de monitores, e $\mathbf{T}$ é a árvore topológica do SD.

Esta expressão pode ser melhor entendida observando-se o fluxograma da Figura 4.6.

Pelo fluxograma apresentado é possível perceber que, se existir um monitor na posição x_{i_j} , o componente c_{i_j} tem sua corrente conhecida, logo não é ambíguo. Em caso contrário, é verificado se algum filho de c_{i_j} é ambíguo. Se nenhum for ambíguo, então c_{i_j} pode ter sua corrente determinada, pois todas as correntes de seus filhos são conhecidas. Este procedimento recursivo equivale a verificar se a corrente do componente c_{i_j} pode ser determinada pela aplicação da lei das correntes de *Kirchhoff* na barra j . Se também não for possível determinar a corrente em c_{i_j} pela segunda alternativa, é verificado se ela pode ser determinada pela aplicação da lei das correntes de *Kirchhoff* na barra i , e se não for possível o componente c_{i_j} é ambíguo.

A ambiguidade topológica total de um SD pode ser determinada pela Equação (4.9) a seguir:

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} a_{i_j}(\mathbf{X}, \mathbf{T}), \quad (4.9)$$

Figura 4.6: Procedimento para determinar se um componente c_{ij} é ambíguo.

4.3.6 Cobertura dos afundamentos de tensão

A cobertura dos afundamentos de tensão em um SD, pode ser mensurada a partir da obtenção da **MTDF**, como proposto por (Olguin e Bollen, 2003a). Após a obtenção da **MTDF**, por meio do método de posição de falta (Seção 2.1.1), escolhe-se um limiar para indicar abaixo de qual valor de tensão o monitor de qualidade de energia deve passar a registrar as ocorrências. Posteriormente, constrói-se a matriz de cobertura (**MC**) com as mesmas dimensões da matriz de tensões remanescentes, atribuindo-se o valor 1 às posições da matriz de cobertura correspondentes a valores abaixo do limiar, e o valor 0 às posições com valores acima do limiar estabelecido, conforme Equação (4.10).

$$mc_{i_j} = \begin{cases} 1, & \text{se } mtdf_{i_j} < \epsilon \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (4.10)$$

sendo que $mtdf_{i_j}$ é o elemento i_j da MTDF obtida de acordo com a Equação (2.2), e ϵ é o limiar para indicar abaixo de qual valor de tensão o monitor de qualidade de energia deve passar a registrar as ocorrências.

Por meio do produto vetorial entre $\mathbf{MC}$ e o vetor de alocação de monitores nas barras X^b , é possível perceber em quais barras os afundamentos de tensão podem ser monitorados. No vetor $\mathbf{V}$, resultante da Equação 4.11, as posições com valores maiores que zero representam as barras em que os afundamentos de tensão podem ser monitorados pelos monitores alocados, considerando o limiar estabelecido.

$$\mathbf{V} = \mathbf{MC} \cdot X^b. \quad (4.11)$$

Aqui é importante lembrar que o monitor instalado em qualquer componente (alimentador principal, carga, ou ramal) conectado à uma barra pode fornecer a informação da tensão naquela barra. Portanto, o vetor de alocação X deve ser modificado, para possuir dimensão igual ao número de barras. O vetor de alocação nas barras, X^b deve possuir em cada posição referente a uma barra a soma dos monitores alocados nos componentes conectados à esta barra, como mostra a Equação 4.12.

$$x_i^b = \sum_{j \in \chi_i} x_{i_j}, \quad (4.12)$$

sendo χ_i o conjunto de filhos da barra i , e x_{i_j} a posição do vetor de alocação associada ao j -ésimo componente conectado à i -ésima barra.

Para facilitar o entendimento da montagem do vetor de alocação nas barras, considere os monitores alocados no SD de seis barras da Figura 4.7, na qual os quadrados pretos representam os monitores instalados nos componentes.

Na figura, observa-se que o sistema de 6 barras possui 13 componentes a partir da barra 1. Contudo, o vetor de alocação nas barras X^b possui apenas 6 posições. A primeira posição, associada à barra 1, possui valor zero. A segunda posição, associada à barra 2, e a terceira posição, associada a barra 3, possuem valor um. Já a quarta posição de X^b possui valor três, a

Figura 4.7: Monitores de QEE alocados no SD de 6 barras.

quinta posição possui valor zero, e a sexta, valor 2.

Como já foi mencionado, no vetor $\mathbf{V}$ as posições com valores maiores que zero representam as barras em que os afundamentos de tensão podem ser monitorados pelos monitores alocados. Contudo, nem todas as posições deste vetor com valor igual a zero implicam, necessariamente, em afundamentos de tensão não monitorados. Uma posição do vetor $\mathbf{V}$ pode ser igual a zero porque todos os elementos de uma linha da matriz $\mathbf{MC}$ são iguais a zero, o que resulta de não haver afundamentos de tensão naquela linha de $\mathbf{MC}$ com valores abaixo do limiar estabelecido. Portanto, é fundamental garantir que esta situação não influencie na determinação da quantidade de afundamentos de tensão que não são percebidos por um arranjo de monitores. Esta garantia é obtida pela multiplicação da matriz $\mathbf{MC}$ por um vetor que possua todas as posições iguais a 1, como mostra a Equação 4.13:

$$\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{MC} \cdot \mathbf{1}, \quad (4.13)$$

na qual $\mathbf{1}$ é um vetor de uns com dimensão igual a quantidade de barras do SD.

O resultado da Equação 4.13 possibilita afirmar que se alguma posição de $\bar{\mathbf{V}}$ for igual a zero, isto é devido ao fato desta linha da matriz $\mathbf{MC}$ ter todos os elementos iguais a zero. Dispondo dos vetores $\mathbf{V}$ e $\bar{\mathbf{V}}$ é proposta uma nova forma de avaliar o número de barras do SD nas quais os afundamentos de tensão podem ser monitorados, como mostram as Equações 4.14 e 4.15.

$$u_i = \begin{cases} 1, \text{ se } v_i=0 \text{ e } \bar{v}_i>0 \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}, \quad (4.14)$$

na qual as posições com valor igual a 1 no vetor U indicam as barras em que os afundamentos de tensão não serão monitorados.

$$f_5(x) = \sum_{i=1}^n u_i, \quad (4.15)$$

que representa o total de barras em que os afundamentos não poderão ser monitorados.

4.3.7 Redundância no monitoramento dos afundamentos de tensão

A redundância no monitoramento dos afundamentos visa determinar quantas vezes, em média, os afundamento de tensão observados em cada barra sensibilizam os monitores alocados. Esta informação é obtida por meio da Equação 4.16.

$$f_6(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i. \quad (4.16)$$

4.3.8 Função objetivo do problema de otimização proposto

É proposto um modelo que possibilite simultaneamente: minimizar o custo do monitoramento (função $f_1(x)$ da Equação 4.3), maximizar o monitoramento das cargas (função $f_2(x)$ da Equação 4.5), maximizar o monitoramento dos ramais (função $f_3(x)$ da Equação 4.7), minimizar a ambiguidade topológica (função $f_4(x)$ da Equação 4.9), minimizar a quantidade de afundamentos que não possam ser monitorados (função $f_5(x)$ da Equação 4.15), e maximizar a redundância dos afundamentos monitorados (função $f_6(x)$ da Equação 4.16). Logo, a função objetivo do problema proposto é definida por (4.17):

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } f_1(x) \\
& \text{maximize } f_2(x) \\
& \text{maximize } f_3(x) \\
& \text{minimize } f_4(x) \\
& \text{minimize } f_5(x) \\
& \text{maximize } f_6(x)
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Com este modelo será possível determinar um conjunto de soluções ótimas, que permitam o melhor monitoramento do sistema, considerando todos os seis aspectos propostos simultaneamente. A Tabela 4.1 resume os objetivos do problema de otimização com base nos critérios apresentados neste capítulo.

Tabela 4.1: Resumo dos objetivos de problema de otimização.

i	Objetivo	$f_i(x)$
1	minimizar o custo do monitoramento	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \cdot x_{ij}$
2	maximizar o monitoramento das cargas	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} l_{ij} \cdot x_{ij}$
3	maximizar o monitoramento dos ramais	$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} d_{ij} \cdot x_{ij}$
4	minimizar a ambiguidade topológica	$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} a_{ij}(\mathbf{X}, \mathbf{T})$
5	minimizar os afundamentos não monitorados	$f_5(x) = \sum_{i=1}^n u_i$
6	maximizar a redundância do monitoramento dos afundamentos	$f_6(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i$

4.4 Aplicação do Algoritmo AEMT ao Problema Proposto

A aplicação do algoritmo AEMT para a resolução do modelo proposto foi realizada considerando os indivíduos como vetores binários, em que cada posição do vetor representa um possível local de instalação dos monitores. Portanto, um indivíduo representa um vetor de

existência (ver Seção 4.3.1), ou seja, cada indivíduo representa uma possível solução do problema e será avaliado pelas funções objetivo (aptidão). Cada indivíduo possui tamanho igual ao número de possíveis locais de instalação dos monitores, sendo que o valor 1 em uma posição do vetor indica a presença de um monitor no local correspondente a esta posição. A Figura 4.8 é do sistema exemplo de 6 barras e sua representação em árvore, conforme anteriormente apresentados neste capítulo, e o vetor alocação para o sistema exemplo, com tamanho 13, igual ao número de componentes, ou seja igual ao número de possíveis pontos de instalação.

Figura 4.8: Exemplo da aplicação do AEMT ao problema proposto. a) Sistema exemplo de 6 barras e 13 componentes. b) Representação em árvore do sistema de 6 barras. c) Vetor alocação para o sistema de 6 barras, com comprimento igual a 13.

Para a aplicação do AEMT ao problema modelado, foram utilizadas 12 tabelas de subpopulações, para avaliar cada um dos 6 objetivos do problema separadamente e para avaliar seis ponderações entre os objetivos, conforme indicado na Tabela 4.2. Cabe ressaltar que estas tabelas foram utilizadas em todos os testes realizados no contexto desta tese.

A Figura 4.9 exemplifica a população inicial aleatória gerada no primeiro passo do AEMT para a aplicação no SD apresentado na Figura 4.8. Neste exemplo, o *Indivíduo*₁ indica a instalação de monitores nos componentes c_{11} , c_{23} , c_{42} e c_{52} (L_1 , L_4 , L_7 , L_{13} , respectivamente, conforme o diagrama unifilar da Figura 4.8 a)). A solução indicada por este indivíduo teria custo 4, se for

considerado que o custo de instalação de cada monitor é igual a 1, sendo a aptidão para cada um dos demais objetivos é determinada pelas equações 4.5, 4.7, 4.9, 4.15, 4.16. O *Indivíduo*₂ indica a instalação de monitores nos componentes c_{21} e c_{43} (L_2 , L_8 , respectivamente). Já o *Indivíduo* _{n} indica instalação de monitores em todos os 13 locais possíveis.

Tabela 4.2: Tabelas de subpopulações avaliadas de acordo com os seis objetivos do problema e por ponderações entre os objetivos.

Subpopulação	Objetivo
1	$f_1(x)$
2	$f_2(x)$
3	$f_3(x)$
4	$f_4(x)$
5	$f_5(x)$
6	$f_6(x)$
7	$f_1(x) + f_2(x)$
8	$f_1(x) + f_2(x)$
9	$f_1(x) + f_2(x)$
10	$f_1(x) + f_2(x)$
11	$f_1(x) + f_2(x)$
12	$f_1(x) + f_2(x)$

Figura 4.9: Exemplo de indivíduos de uma população para aplicação do AEMT no SD de 6 barras.

A partir de uma população inicial, como a exemplificada na Figura 4.9, o algoritmo do AEMT, executa os demais passos (seleção, cruzamento e mutação) até atingir o número de gerações pré-determinado. Ao final da execução as soluções não dominadas representam os melhores locais para instalação dos monitores. Cada indivíduo do conjunto de Pareto passa a representar um arranjo diferente dos monitores, sendo os indivíduos (soluções) representados no espaço

dos objetivos pela fronteira de Pareto, como ilustrado pela Figura 4.10 para os indivíduos do conjunto de Pareto apontados na Tabela 4.3^{1, 2}.

Tabela 4.3: Conjunto de Pareto que representa a solução para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 6 barras.

Indivíduo	Vetor Alocação	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
ind ₁	0000001000000	1	0	3	12	3	0,5
ind ₂	0000001100100	3	40	3	10	3	1,3
ind ₃	1010011010000	5	20	3	6	0	2
ind ₄	1110011100110	8	60	4	2	0	3
ind ₅	1111111001110	10	80	5	0	0	4
ind ₆	1111111111111	13	100	5	0	0	5

É importante chamar atenção para a forma como a fronteira de Pareto foi apresentada na Figura 4.10. Como o problema foi modelado com seis objetivos, o espaço dos objetivos, no qual é representada a fronteira de Pareto, tem dimensão igual a seis. Dada a dificuldade em representar o espaço com seis dimensões, optou-se por apresentar a fronteira de Pareto em duas dimensões, sempre com o custo no eixo das abcissas, e os demais objetivos no eixo das ordenadas. Esta representação será adotada para a apresentação dos resultados obtidos neste documento com o modelo proposto. Em um primeiro momento, observando apenas um par de objetivos, o leitor pode ser induzido a pensar que algumas das soluções apresentadas são dominadas. Contudo, ressalta-se que isto não é verdade. Esta impressão equivocada resulta justamente do fato de um espaço de dimensão seis estar sendo representado em apenas duas dimensões. Para verificar que todas as soluções apresentadas para o exemplo são não-dominadas, basta relembrar o conceito de dominância e analisar os valores das funções objetivos na Tabela 4.3.

Quanto às soluções apresentadas, observando a Figura 4.10, é possível afirmar que os *ind₂*, *ind₃* e *ind₄* apresentam boas relações de custo benefício. Logo, podem ser adotadas para o monitoramento do SD. A escolha da solução ideal dependerá de vários fatores, como, por exemplo, da política da concessionária quanto ao monitoramento da QEE, do conhecimento do especialista que tomará a decisão quanto a QEE do SD em questão, e de outros fatores que podem influenciar a decisão do responsável. Cabe ressaltar que o objetivo desta tese não contempla a tomada de decisão em problemas multiobjetivo, contudo, é válido afirmar que a solução que for adotada, dentre as apontadas no conjunto Pareto ótimo, será uma boa solução para o problema, por ser uma solução não dominada.

¹Os valores para os objetivos $f_2(x)$, $f_5(x)$ e $f_6(x)$ foram atribuídos hipoteticamente para confecção deste exemplo, uma vez que não são conhecidos os valores das cargas conectadas ao SD de 6 barras, nem as impedâncias das linhas.

²ind₁ indica a instalação em [L₇], ind₂ em [L₇, L₉, L₈], ind₃ em [L₁, L₃, L₆, L₇, L₁₂], ind₄ em [L₁, L₂, L₃, L₆, L₇, L₈, L₉, L₁₀], ind₅ em [L₁, L₂, L₃, L₄, L₅, L₆, L₇, L₉, L₁₀, L₁₃] e ind₆ em todos os componentes do SD.

Figura 4.10: Fronteira de Pareto formada pelos indivíduos da Tabela 4.3.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi modelado o problema de alocação de monitores de QEE em sistemas de distribuição, sob o ponto de vista da otimização multiobjetivo. Em seguida, ilustrou-se como é a aplicação do algoritmo evolutivo multiobjetivo AEMT para o problema modelado. No próximo capítulo serão apresentados os sistemas de distribuição que foram analisados neste trabalho, e em seguida, os resultados obtidos.

Capítulo 5

Sistemas Elétricos Utilizados

Nesse capítulo serão apresentados os SDs que foram utilizados nessa pesquisa para testar o modelo proposto para a alocação de monitores de QEE. Foram modelados os SDs de 13, 34 e 37 barras do IEEE (Kersting, 2001), dispondo do *software DIgSILENT PowerFactory*, para a obtenção das Matrizes de Tensões Durante Falta (MTDF). Cabe ressaltar que apesar de terem um número próximo de barras, os sistemas de 34 e de 37 barras possuem características bem diferentes, como será comentado ao longo deste capítulo.

5.1 O *Software DIgSILENT PowerFactory*

O início do desenvolvimento do *software DIgSILENT PowerFactory* ocorreu no ano de 1976. O nome *DIgSILENT* é originado de *DIgital SIMuLation and Electrical NeTwork* e algumas de suas principais possibilidades de utilização são para (DIgSILENT, 2010):

- Cálculo do fluxo de carga e análise completa de curtos-circuitos;
- Análise e otimização de rede em baixa tensão;
- Dimensionamento de cabos (*IEC Cable Sizing*);
- Simulação dinâmica e transitória;
- Análise da proteção, harmônica e de estabilidade de tensão, dentre outras.

Nesta pesquisa, o programa *DIgSILENT PowerFactory* foi utilizado para a obtenção da MTDF dos SDs analisados. Para tanto, utilizou-se a rotina de cálculo do fluxo de carga para fornecer a

tensão em regime permanente em cada barra dos SDs, e a rotina de cálculo de curtos-circuitos para fornecer a tensão de curto-circuito e remanescente em cada barra.

O *DIgSILENT PowerFactory* possui uma rotina para o cálculo dos parâmetros elétricos das linhas, e também possibilita esse cálculo através da inserção das distâncias entre os condutores, da altura destes com relação ao solo, e os valores referentes aos dados do condutor utilizado. Para a simulação dos SDs estudados, foram utilizados os dados dos transformadores, das linhas e das cargas, conforme apresentados em (Kersting, 2001), e foram utilizados equivalentes de rede representando as subestações.

Foi utilizada uma licença acadêmica do *DIgSILENT PowerFactory*, que permite simular sistemas com no máximo 50 nós, e por este motivo não foram modelados sistemas de maior porte na validação da metodologia proposta. Na próxima Seção serão apresentados os SDs estudados e modelados.

5.2 Sistemas de Distribuição Analisados

5.2.1 Circuito alimentador IEEE de 13 barras

Apesar deste alimentador ser pequeno, o mesmo apresenta algumas características interessantes para o propósito, como:

1. É um alimentador curto que opera com tensão nominal de 4,16 kV bastante carregado;
2. Possui linhas aéreas e subterrâneas;
3. Cargas modeladas como concentradas e como distribuídas; e
4. As cargas são desequilibradas.

A Tabela 5.1 apresenta os trechos que conectam cada barra do alimentador de 13 barras, evidenciando que estas não são muito longas. Na tabela apresentada, o trecho 633 – 634 é um transformador, e o trecho 671 – 692 é uma chave.

Tabela 5.1: Trechos do circuito alimentador IEEE de 13 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Comprimento (ft)
632	645	500
632	633	500
633	634	0
645	646	300
650	632	2000
684	652	800
632	671	2000
671	684	300
671	680	1000
671	692	0
684	611	300
692	675	500

A Tabela 5.2 apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras. Já a Tabela 5.3 apresenta as cargas distribuídas ao longo dos trechos. Importa ressaltar que nestas tabelas, a potência informada de cada carga é o somatório das potências das 3 fases. O dado como informado nas Tabelas 5.2 e 5.3 foi o utilizado para computar a função definida por 4.4. Contudo, para a modelagem no *software DIgSILENT PowerFactory*, foram consideradas as cargas desbalanceadas, de acordo com Kersting (2001).

Tabela 5.2: Cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 13 barras.

Barra	Potência (kW)
634	400
645	170
646	230
652	128
671	1155
675	613
692	170
611	170
Total	3266

Tabela 5.3: Cargas modeladas com parâmetros distribuídos no circuito alimentador IEEE de 13 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Potência (kW)
632	671	200
	Total	200

O circuito alimentador IEEE de 13 barras é representado pelo diagrama unifilar ilustrado na Figura 5.1, na qual se percebe que o alimentador apresenta 20 componentes, numerados de L_1 até L_{20} . O alimentador principal deste circuito é composto pelo caminho que parte da barra 650 à barra 611.

Figura 5.1: Representação unifilar do circuito alimentador IEEE de 13 barras.

O alimentador de 13 barras foi modelado no *software DigSILENT PowerFactory*, no intuito de se obter a MTDF por meio da utilização das rotinas de fluxo de carga e de cálculo de curto-circuito. A Figura 5.2 apresenta o resultado da execução da rotina de cálculo de fluxo de carga para o alimentador de 13 barras. Nesta figura, as caixas de texto localizadas próximo às barras apresentam os valores da tensão de fase (kV), da tensão de fase (p.u.), e do ângulo de tensão (graus), respectivamente, na situação de regime permanente. Na Figura 5.3 são apresentados os valores das tensões remanescentes em cada uma das barras após a execução da rotina de cálculo de curto-circuito para uma falta trifásica franca aplicada na barra 671.

Para a obtenção da MTDF, é preciso executar a rotina de cálculo de curto-circuito para cada uma das barras, em seguida dividi-se os valores das tensões remanescentes em cada barra para as situações de curto-circuito pela da tensão em regime em cada barra. Por fim, basta organizar os valores em uma matriz, na qual as colunas representam os locais de aplicação das faltas, e as linhas representam as tensões observadas em cada barra para cada situação de falta.

Figura 5.2: Alimentador IEEE de 13 barras modelado no *software DigSILENT PowerFactory*, apresentando os valores após execução da rotina de cálculo de fluxo de carga.

Figura 5.3: Alimentador IEEE de 13 barras modelado no *software* Digsilent PowerFactory, apresentando os valores das tensões nas barras para um curto-circuito trifásico franco aplicado na barra 671.

Para o circuito alimentador de 13 barras, a MTDF obtida com a aplicação de curtos-circuitos trifásicos¹² francos em cada uma das barras é apresentada na Tabela 5.4. Uma representação gráfica da MTDF da Tabela 5.4 é apresentada na Figura 5.4, em que a cor preta representa o valor 0 p.u. e a cor branca 1 p.u.. Os demais tons de cores apresentados buscam quantificar a severidade dos afundamentos evidenciados respeitando a escala que vai de 0 a 1 p.u. Ressalta-se que por fornecer, através de rápida inspeção visual, as informações sobre a situação das tensões remanescentes em cada barra para cada situação de curto-circuito aplicada, somente a apresentação gráfica da MTDF será fornecida para as demais simulações realizadas.

Tabela 5.4: Matriz de tensões durante a falta para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito trifásico franco em cada uma das barras.

Barra de aplicação da falta													
	650	632	633	634	645	646	671	680	684	652	611	692	675
650	0	0,42	0,54	0,63	0,50	0,54	0,67	0,63	0,71	0,65	0,70	0,65	0,71
632	0	0	0,14	0,34	0,13	0,15	0,35	0,34	0,49	0,38	0,47	0,38	0,43
633	0	0	0	0,33	0,13	0,12	0,36	0,33	0,49	0,38	0,47	0,38	0,42
634	0	0	0,12	0	0,11	0,13	0,09	0	0,46	0,15	0,26	0,07	0,13
645	0	0	0,14	0,33	0	0,14	0,35	0,33	0,42	0,38	0,47	0,38	0,43
646	0	0	0	0,33	0,13	0	0,36	0,33	0,49	0,38	0,47	0,38	0,42
671	0	0	0,12	0	0,12	0,13	0	0	0,47	0,08	0,19	0,07	0,13
680	0	0	0,12	0	0,11	0,13	0,09	0	0,46	0,15	0,26	0,07	0,13
684	0	0	0,15	0,33	0	0,19	0,37	0,33	0	0,41	0,44	0,37	0,44
652	0	0	0,12	0	0,12	0,13	0	0	0,47	0	0,19	0,07	0,13
611	0	0	0,12	0	0,12	0,14	0	0	0,48	0,08	0	0,07	0,14
692	0	0	0,12	0	0,11	0,13	0,09	0	0,46	0,15	0,26	0	0,13
675	0	0	0,12	0	0,11	0,13	0,09	0	0,46	0,15	0,26	0,07	0

¹Em todos os testes realizados foram simuladas faltas trifásicas, por esta ser a situação mais severa que pode ocorrer.

²No sistema de 13 barras existem alguns trechos do alimentador que são monofásicos ou bifásicos. Nestes trechos foram aplicadas faltas envolvendo o maior número de fases possíveis.

Figura 5.4: Representação gráfica da MTDF para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito trifásico franco em cada uma das barras.

De posse da MTDF do alimentador de 13 barras, para a situação de curto franco em todas as barras, é possível obter a matriz de cobertura (MC) para o monitoramento dos afundamentos de tensão, por meio da Equação 4.10. Como apresentado na Equação 4.10, para cada posição da MTDF, quando o valor da tensão for menor que o limiar estabelecido, a posição equivalente na MC tem valor igual a um, e, caso contrário, tem valor igual a zero. A MC também pode ser visualizada graficamente, na qual, em cada posição da matriz, a cor branca indica valor igual a um, e a cor preta indica valor igual a zero.

A Figura 5.5 apresenta a MC para o sistema de 13 barras, considerando a MTDF da Figura 5.4 e um limiar igual à 0,9 p.u.. Pela figura é possível observar que todos os valores da MC são iguais a 1, ou seja, um curto-circuito franco que ocorra em qualquer barra provoca um afundamento de tensão, com tensão menor que 0,9 p.u. em todas as outras barras do sistema.

Figura 5.5: Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito franco em cada uma das barras e limiar igual à 0,9 pu.

Figura 5.6: Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando curto-circuito franco em cada uma das barras e um limiar igual à 0,4 pu.

Já na Figura 5.6, ilustra-se a MC para o sistema de 13 barras, considerando a MTDF da Figura 5.4 e um limiar igual à 0,4 p.u.. Pela figura, é possível observar quais os valores da MC são iguais a um, ou seja, para quais curtos-circuitos francos ocorrem afundamento de tensão,

com tensão menor que 0,4 p.u. nas outras barras do sistema.

As matrizes de cobertura obtidas para situação de curto-circuito franco no alimentador de treze barras, considerando os limiares de 0,9 e 0,4 p.u. serão utilizadas para testar o modelo de otimização proposto. Além destes, outro caso de teste foi desenvolvido para o alimentador de 13 barras. Desta vez, considerando curtos-circuitos com uma impedância de falta com valor diferente (entre 0 e 5 ohms) para cada barra, conforme apresentado na Tabela 5.5. A MTDF para esta situação é ilustrada na Figura 5.7.

Tabela 5.5: Impedâncias de falta utilizadas em cada barra do SD de 13 barras para simulação dos curtos-circuitos.

Barra	650	632	633	634	645	646	671	682	684	652	611	692	675
Impedância (Ohms)	0	0	1	2	3	3	4	4	5	3	4	4	5

Figura 5.7: Representação gráfica da MTDF para o sistema de 13 barras, considerando curtos-circuitos nas barras, com impedância de falta variando entre 0 e 5 ohms.

A MC referente a Figura 5.7, considerando um limiar igual a 0,9 pu é apresentada na Figura 5.8.

Figura 5.8: Representação gráfica da MC para o sistema de 13 barras, considerando a MTDF da Figura 5.7 e um limiar igual à 0,9 p.u..

5.2.2 Circuito alimentador IEEE de 37 barras

O circuito alimentador IEEE de 37 barras é um alimentador real localizado na Califórnia - EUA (Kersting, 2001), no qual é possível evidenciar as seguintes características:

- Opera com tensão nominal de 4,8 kV;
- Todas as linhas são subterrâneas;
- O circuito é relativamente ramificado; e
- As cargas são bastante desbalanceadas.

A Tabela 5.6 apresenta as linhas que conectam cada barra do alimentador de 37 barras, incluindo o trecho 775 – 709 que é um transformador. A Tabela 5.7 apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 37 barras. Novamente, para cada carga é informado o somatório das potências das três fases. Contudo, para a modelagem no *software* *DIgSILENT PowerFactory*, foram consideradas as cargas desbalanceadas. O diagrama unifilar do alimentador de 37 barras é apresentado na Figura 5.9, na qual se percebe que o alimentador possui 61

componentes, numerados de $L1$ a $L61$. O tronco deste circuito é composto pelo caminho que parte da barra 799 à barra 741.

Tabela 5.6: Trechos do circuito alimentador IEEE de 37 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Comprimento (ft)
701	702	960
702	705	400
702	713	360
702	703	1320
703	727	240
703	730	600
704	714	80
704	720	800
705	742	320
705	712	240
706	725	280
707	724	760
707	722	120
708	733	320
708	732	320
709	731	600
709	708	320
710	735	200
710	736	1280
711	741	400
711	740	200
713	704	520
714	718	520
720	707	920
720	706	600
727	744	280
730	709	200
733	734	560
734	737	640
734	710	520
737	738	400
738	711	400
744	728	200
744	729	280
775	709	0
799	701	1850

A Figura 5.10 apresenta a MTDF obtida com a simulação de curtos-circuitos francos em cada barra do circuito de 37 barras, e, em seguida, a Figura 5.11 apresenta a MC obtida para a MTDF da Figura 5.10, considerando-se um limiar de 0.9 pu. Para a obtenção destas matrizes, as barras foram consideradas na seguinte ordem: 701, 702, 705, 712, 742, 713, 704, 714, 718, 720, 706, 725, 707, 724, 722, 703, 727, 744, 728, 729, 730, 709, 731, 775, 708, 732, 733, 734, 710, 735, 736, 737, 738, 711, 740 e 741.

Tabela 5.7: Cargas conectadas em cada barra do circuito alimentador IEEE de 37 barras.

Barra	Potência (kW)
701	630
712	85
713	85
714	38
718	85
720	85
722	161
724	42
725	42
727	42
728	126
729	42
730	85
731	85
732	42
733	85
734	42
735	85
736	42
737	140
738	126
740	85
741	42
742	93
744	42
Total	2457

Figura 5.9: Circuito alimentador do sistema de distribuição de 37 barras do IEEE.

Figura 5.10: Representação gráfica da MTDF para o sistema de 37 barras, considerando curtos-circuitos francos nas barras.

Figura 5.11: Representação gráfica da MC para o sistema de 37 barras, considerando a MTDF da Figura 5.10 e limiar igual a 0,9 pu.

5.2.3 Circuito alimentador IEEE de 34 barras

O circuito alimentador IEEE de 34 barras é um alimentador real localizado no Arizona - EUA (Kersting, 2001), no qual é possível evidenciar as seguintes características:

- Opera com tensão nominal de 24,9 kV;
- É um sistema com linhas muito longas e é bastante carregado;
- Apresenta um transformador abaixador para um pequeno trecho que opera com tensão nominal de 4,16 kV,
- O circuito apresenta poucas ramificações laterais;
- Cargas modeladas como concentradas e como distribuídas; e
- As cargas são desequilibradas.

A Tabela 5.8 apresenta as linhas que conectam cada barra do alimentador de 34 barras, incluindo a linha 832 – 888 que é um transformador.

A Tabela 5.9 apresenta as cargas conectadas às barras do circuito alimentador IEEE de 34 barras, enquanto a Tabela 5.10 discrimina as cargas modeladas com parâmetros distribuídos do circuito alimentador. Como nas outras tabelas que apresentam dados de cargas, nas Tabelas 5.9 e 5.10, para cada carga, é informado o somatório das potências das 3 fases. Contudo, para a modelagem no *software DlgSILENT PowerFactory*, foram consideradas as cargas desbalanceadas. A Figura 5.12 apresenta o diagrama o unifilar do alimentador de 34 barras do IEEE, composto por 39 componentes, numerados de L1 até L39. O Alimentador principal deste circuito é composto pelo caminho que parte da barra 800 à barra 838.

A Figura 5.13 apresenta a MTDF obtida com a simulação de curtos-circuitos trifásicos francos em cada barra do circuito de 34 barras, e, em seguida, a Figura 5.14 apresenta a MC obtida para a MTDF da Figura 5.13, considerando-se um limiar de 0,9 p.u.. Para a obtenção destas matrizes, as barras foram consideradas na seguinte ordem: 800, 802, 806, 808, 810, 812, 814, 850, 816, 818, 820, 822, 824, 826, 828, 830, 854, 856, 852, 832, 888, 890, 858, 864, 834, 842, 844, 846, 848, 860, 836, 840, 862 e 838.

Tabela 5.8: Trechos do circuito alimentador IEEE de 34 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Comprimento (ft)
800	802	2580
802	806	1730
806	808	32230
808	810	5804
808	812	37500
812	814	29730
814	850	10
816	818	1710
816	824	10210
818	820	48150
820	822	13740
824	826	3030
824	828	840
828	830	20440
830	854	520
832	858	4900
832	888	0
834	860	2020
834	842	280
836	840	860
836	862	280
842	844	1350
844	846	3640
846	848	530
850	816	310
852	832	10
854	856	23330
854	852	36830
858	864	1620
858	834	5830
860	836	2680
862	838	4860
888	890	10560

Tabela 5.9: Cargas conectadas em cada barra do circuito alimentador IEEE de 34 barras.

Barra	Potência (kW)
860	60
840	27
844	405
848	60
890	450
830	45
Total	1047

Tabela 5.10: Cargas modeladas com parâmetros distribuídos do circuito alimentador IEEE de 34 barras.

Barra Origem	Barra Destino	Potência (kW)
802	806	55
808	810	16
818	820	34
820	822	135
816	824	5
824	826	40
824	828	4
828	830	7
854	856	4
832	858	15
858	864	2
858	834	32
834	860	146
860	836	82
836	840	40
862	838	28
842	844	9
844	846	45
846	848	23
	Total	722

Figura 5.12: Circuito alimentador do sistema de distribuição de 34 barras do IEEE.

Figura 5.13: Representação gráfica da MTDF para o sistema de 34 barras, considerando curtos-circuitos francos nas barras.

Figura 5.14: Representação gráfica da MC para o sistema de 34 barras, considerando a MTDF da Figura 5.13 e limiar igual à 0,9 pu.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os SDs que serão utilizados para testar e validar a metodologia proposta. Inicialmente, foi apresentado o *software DIgSILENT PowerFactory* que foi utilizado para o cálculo de curto-circuito e cálculo do fluxo de carga, permitindo a obtenção das MTDFs para os sistemas analisados. Em seguida, cada sistema foi apresentado, evidenciando-se as características topológicas mais importantes para a utilização no modelo proposto para alocação de monitores de QEE em SDs. Para cada SD foram obtidas as MCs que serão utilizadas, destacando-se os parâmetros que permitiram a obtenção destas. No próximo capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada caso proposto.

Capítulo 6

Resultados Obtidos

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o modelo proposto para os sistemas de distribuição apresentados no Capítulo 5. Os resultados serão discutidos e em seguida comparados com os obtidos com outros modelos aplicáveis ao problemas e disponíveis na literatura correlata.

6.1 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 13 barras

A modelagem proposta para alocação de monitores em sistemas de distribuição foi testada inicialmente com o circuito de 13 barras previamente apresentado (Kersting, 2001), sendo considerados 3 cenários distintos para este circuito.

A primeira situação considerou a ocorrência de curtos-circuitos trifásicos francos (sólidos) em todas as barras do SD para a obtenção da MTDF, e um limiar de 0,9 pu de tensão remanescente para a obtenção da MC. O segundo cenário considerou a mesma MTDF do primeiro, diferindo no limiar de 0,4 pu adotado para a obtenção da MC. Já no terceiro caso de teste a MTDF foi obtida considerando impedâncias de falta com valores diferentes ao longo do alimentador para a obtenção da MTDF, e um limiar de 0,9 pu para a MC.

Todos estes casos de teste foram discutidos no capítulo anterior. Em todos os testes foi considerado que os custos de instalação dos monitores em todos os componentes são iguais, com valor unitário.

Nos testes realizados com o sistema de 13 barras, fixou-se a população do algoritmo AEMT em 900 indivíduos. A seleção foi realizada como descrito no Capítulo 3, considerando um

torneio de tamanho 16 para subpopulação que represente a fronteira de um determinado nível de dominância. A taxa de cruzamento foi de 75% e a de mutação 1%. Vale relembrar que o sistema de distribuição de 13 barras possui 20 componentes (considerando o tronco do alimentador, ramais e cargas) que podem ser monitorados. Após 1000 gerações, foram obtidos os conjuntos de soluções não dominadas que fornecem as fronteiras de Pareto apresentadas a seguir para cada um dos casos de teste realizados.

6.1.1 Cenário 1

A Figura 6.1 apresenta o conjunto de soluções não dominadas para o monitoramento do alimentador de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curto-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.

Analizando a Figura 6.1, verifica-se que tanto a eficiência do sistema de monitoramento quanto o investimento a ser feito crescem na medida em que novos monitores são inseridos, conforme é esperado. Portanto, é importante observar a relação de custo-benefício (custo/eficiência do monitoramento) para decidir até que ponto é viável a instalação de novos equipamentos para o monitoramento. Cabe relembrar que são adotados 5 critérios de eficiência que estão relacionados entre si, além de se relacionarem com o custo. Considerando apenas o monitoramento dos afundamentos de tensão, observa-se que um único monitor é capaz de perceber a ocorrência de afundamentos de tensão provocados por curtos-circuitos francos, com tensão remanescente menor que 0,9 pu em qualquer barra do sistema. Quanto ao aspecto da redundância do monitoramento dos afundamentos, é possível observar que a razão entre a variação da redundância e a variação do custo do monitoramento para inserção de novos monitores é praticamente linear. Isto demonstra que para as condições consideradas, no tocante à redundância do monitoramento, é sempre conveniente aumentar o investimento, pois o retorno na redundância do monitoramento frente aos afundamentos de tensão será proporcional ao investimento realizado.

Com relação aos aspectos topológicos, observa-se que, para cada um dos três aspectos, existe um ponto até o qual é interessante investir. A partir deste ponto, surge a região saturada da curva de custo/benefício, na qual não há um bom retorno, do ponto de vista da eficiência do monitoramento, para os investimentos realizados. As soluções posteriores a este ponto da curva não são atrativas do ponto de vista econômico, pois o custo agregado ao ganho de qualidade nas medições fornecida por estas soluções é bem elevado.

Figura 6.1: Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDf obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.

Com relação ao monitoramento das cargas, nota-se que existem soluções não dominadas que permitem uma boa taxa de retorno para o custo variando de 1 a 4 unidades. Conforme pode ser observado, mesmo entre 4 e 8 unidades de custo, o investimento ainda pode ser atrativo, considerando-se o aspecto do monitoramento das cargas. Com relação ao monitoramento dos

ramais, é possível notar que a variação do custo para a instalação de até 8 monitores obedece uma relação praticamente linear com a variação da quantidade de cargas monitoradas e, para um investimento maior que este, praticamente não há ganho efetivo de monitoramento de ramais.

Já em relação à ambiguidade topológica, percebe-se que a quantidade de componentes ambíguos pode ser diminuída quase que de forma linear até se instalar 9 monitores no sistema, pois com esta quantidade de monitores é possível acabar com a ambiguidade topológica no circuito de 13 barras.

A escolha da quantidade de componentes (pontos) em que serão instalados os monitores deve ser conduzida sempre considerando o orçamento disponível para atingir um certo grau de eficiência, para um determinado critério. Esta tarefa é bastante facilitada pela determinação da fronteira de Pareto, como a determinada na Figura 6.1. O responsável pela decisão poderá priorizar um critério, ou escolher uma solução que apresente uma combinação que ele julgue interessante entre os critérios. Ressalta-se que se a decisão recair sobre qualquer uma das soluções representadas na Figura 6.1, estará sendo escolhida uma solução eficiente para o monitoramento do alimentador de 13 barras. Contudo, as soluções delimitadas pelo retângulo vermelho mostram-se mais atraentes que as demais. As soluções desta região apresentam uma taxa de melhoria quase que linear para a maioria dos critérios observados, além de ficarem antes da região de saturação para a maioria dos critérios. A Tabela 6.1 apresenta algumas soluções pertencentes à região destacada.

Analisando a Tabela 6.1, percebe-se que os objetivos competem entre si. Por exemplo, a solução 1 possui custo 4, monitora 2.398 kW de carga, 2 ramais são monitorados, existem 12 componentes ambíguos, não há nenhuma barra em que os afundamentos não possam ser monitorados, e a redundância do monitoramento dos afundamentos de tensão é de 2,6. Ao observar a solução 2, que também tem custo 4, percebe-se que o monitoramento de 13 ramais implica que nenhuma carga seja monitorada diretamente. Já a solução 13, que apresenta custo 9, permite monitorar diretamente toda a carga do sistema (3.466 kW), contudo, nenhum ramal tem um monitor instalado. Além disso na solução 13, não há ambiguidade topológica no circuito, nem existem barras onde os afundamentos de tensão não possam ser detectados, e a redundância do monitoramento dos afundamentos é de 5,85. A solução 14 permite que 17 ramais sejam monitorados. Contudo, apenas 1.525 kW de carga são monitorados diretamente.

Este é o tipo de análise que o responsável pelo planejamento do sistema de monitoramento

Tabela 6.1: Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 13 barras, considerado a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos

Solução	Componentes Monitorados	$\min$ $f_1(x)$	$\max$ $f_2(x)$	$\max$ $f_3(x)$	$\min$ $f_4(x)$	$\min$ $f_5(x)$	$\max$ $f_6(x)$
1	$L_{10}, L_{14}, L_{17}, L_{20}$	4	2398	2	12	0	2,60
2	L_2, L_4, L_5, L_9	4	0	13	12	0	2,60
3	$L_4, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	4	1141	3	10	0	2,60
4	$L_{10}, L_{14}, L_{17}, L_{18}, L_{20}$	5	2568	2	9	0	3,25
5	$L_2, L_4, L_5, L_9, L_{10}$	5	1155	13	11	0	3,25
6	$L_2, L_4, L_5, L_9, L_{10}, L_{20}$	6	1998	13	8	0	3,90
7	$L_{12}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	6	1941	0	6	0	3,90
8	$L_2, L_4, L_5, L_9, L_{10}, L_{17}, L_{20}$	7	2398	13	8	0	4,55
9	$L_9, L_{10}, L_{12}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	7	2926	4	5	0	4,55
10	$L_2, L_4, L_5, L_9, L_{10}, L_{12}, L_{17}, L_{20}$	8	2628	13	8	0	5,20
11	$L_2, L_3, L_4, L_5, L_9, L_{14}, L_{15}, L_{18}$	8	370	17	2	0	5,20
12	$L_6, L_{10}, L_{12}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	8	3266	0	3	0	5,20
13	$L_3, L_6, L_{10}, L_{12}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	9	3466	0	0	0	5,85
14	$L_2, L_3, L_4, L_5, L_9, L_{10}, L_{14}, L_{15}, L_{18}$	9	1525	17	0	0	5,85

terá que adotar para escolher entre as soluções não dominadas apresentadas após a resolução do modelo multiobjetivo. A decisão deve ser guiada pelo valor disponível para investimento, pela experiência e intuição do decisor, e pelas diretrizes da concessionária.

6.1.2 Cenário 2

Neste caso teste, para o monitoramento do alimentador de 13 barras foi considerada a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu. A Figura 6.2 apresenta o conjunto obtido de soluções não dominadas. Novamente, destaca-se em vermelho a região que pode ser considerada como a mais atraente para as soluções.

Figura 6.2: Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu.

É possível notar que a relação de custo-benefício para os critérios topológicos não sofreram modificações consideráveis quando comparadas às soluções obtidas para a situação anterior. Contudo, evidencia-se uma modificação na curva apresentada pelo objetivo voltado para o monitoramento dos afundamentos de tensão. Observa-se que para este cenário existem soluções

não dominadas que não permitem o monitoramento de todas as barras quanto ao afundamento de tensão. Por exemplo, existe uma solução de custo 6 em que não há nenhum afundamento que não possa ser monitorado, mas também existe uma solução de custo 6 que o afundamento em uma barra não pode ser monitorado. Ressalta-se que as duas soluções são não dominadas, e podem ser adotadas como soluções para o problema. O que ocorre é que para esta situação, o decisor terá de escolher entre obter um melhor desempenho no monitoramento dos afundamentos em detrimento de outro critério.

A Tabela 6.2 apresenta algumas soluções consideradas atraentes para o monitoramento do alimentador de 13 barras para a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu. Nesta tabela é possível observar, por exemplo, algumas soluções em que nem todos os afundamentos podem ser monitorados.

Tabela 6.2: Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 13 barras, considerado a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos

Solução	Componentes Monitorados	$\min$ $f_1(x)$	$\max$ $f_2(x)$	$\max$ $f_3(x)$	$\min$ $f_4(x)$	$\min$ $f_5(x)$	$\max$ $f_6(x)$
1	L_1, L_2, L_9, L_{10}	4	1155	8	16	0	2,45
2	L_4, L_9, L_{10}, L_{14}	4	1155	9	13	1	2,40
3	$L_{10}, L_{12}, L_{18}, L_{20}$	4	2398	0	13	1	2,35
4	$L_1, L_{10}, L_{17}, L_{19}, L_{20}$	5	2526	0	11	0	2,25
5	$L_4, L_{14}, L_{16}, L_{18}, L_{20}$	5	1183	5	8	1	2,95
6	$L_{10}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	6	2886	0	7	1	2,75
7	$L_1, L_3, L_4, L_6, L_{14}, L_{18}$	6	540	5	6	0	3,60
8	$L_2, L_3, L_4, L_{12}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	7	1571	7	4	1	3,90
9	$L_9, L_{10}, L_{12}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	7	2356	7	6	0	4,00
10	$L_1, L_2, L_4, L_9, L_{10}, L_{11}, L_{19}, L_{20}$	8	2126	13	7	0	4,60
11	$L_3, L_6, L_{12}, L_{14}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{20}$	8	2183	2	2	1	4,20
12	$L_1, L_3, L_6, L_{10}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{20}$	9	3236	0	0	0	4,60
13	$L_2, L_4, L_5, L_9, L_{10}, L_{12}, L_{18}, L_{19}, L_{20}$	9	2526	13	3	1	5,10

6.1.3 Cenário 3

O modelo proposto, também foi utilizado para solucionar o problema de alocação de monitores no alimentador de 13 barras para a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos com impedâncias de faltas com valores diferentes nas barras, conforme Tabela 6.3, e a MC obtida para um limiar de tensão de 0,9 pu. A Figura 6.3 apresenta o conjunto obtido de soluções não dominadas.

Tabela 6.3: Impedâncias de falta utilizadas em cada barra do SD de 13 barras para simulação dos curtos-circuitos.

Barra	650	632	633	634	645	646	671	682	684	652	611	692	675
Impedância (Ohms)	0	0	1	2	3	3	4	4	5	3	4	4	5

Pela Figura 6.3 é possível perceber que, novamente, a relação da eficiência pelo custo praticamente não se modifica para os critérios topológicos, em relação aos resultados obtidos para os outros 2 cenários considerados para o alimentador de 13 barras.

Para o objetivo de minimizar o número de afundamentos que não podem ser detectados, observou-se que existe um número maior de soluções com mais de um monitor instalado que não possibilitam o monitoramento de todos os afundamentos de tensão, do que o apresentado pelo cenário 2. Novamente, tais soluções continuam sendo interessantes, pois possibilitam um melhor atendimento de outros critérios em detrimento ao monitoramento de todos os afundamentos de tensão.

Com relação à redundância do monitoramento, observa-se que também há uma maior variação na redundância para soluções com o mesmo custo.

Figura 6.3: Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos com impedâncias de faltas variadas, e a MC para um limiar de tensão de 0,4 pu.

6.2 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 37 barras

A modelagem proposta para a alocação de monitores foi aplicada ao circuito de 37 barras previamente apresentado, considerando a ocorrência de curtos-circuitos francos em todas as

barras do SD para a obtenção da MTDF, e um limiar de 0,9 pu de tensão remanescente para a obtenção da MC. Foi considerado um custo unitário para instalação dos monitores em qualquer componente do sistema.

Para os testes com o sistema de 37 barras, utilizou-se das mesmas configurações dos algoritmos aplicados ao sistema de distribuição anterior. Apenas a população inicial foi modificada para 6.000 indivíduos, em virtude deste ser um problema combinatorial, o que requer uma maior amostragem do espaço de busca com o aumento do tamanho do problema. Este sistema possui 61 componentes (considerando o tronco do alimentador, ramais e cargas) que podem ser monitorados. Após 2.000 gerações, a fronteira de Pareto para este sistema é apresentada na Figura 6.4.

Para o sistema de 37 barras, observa-se que o número de soluções não dominadas encontradas é elevado (4.825 soluções). Isto ocorre justamente pela característica combinatorial do problema, que permite um número maior de arranjos de monitores alocados com diferentes relações entre os critérios de eficiência e o custo. Ressalta-se ainda que o número de soluções não dominadas fornecido é um subconjunto bem pequeno do total de possibilidades de alocação de monitores no sistema (2^{61}). Uma boa alternativa para apontar a solução a ser utilizada é escolher, dentre aquelas que permitem detectar todos os afundamentos de tensão, uma solução que possua valores para os demais objetivos próximos à região de saturação de cada um deles, conforme delimitado pelo retângulo vermelho. A Tabela 6.4 aponta algumas soluções interessantes considerando os critérios colocados.

Observando a Figura 6.4, observa-se que a relação entre a variação da quantidade de carga monitorada pela variação do custo (para a solução que monitora mais carga a um mesmo custo) apresenta um valor aproximadamente constante até a solução de custo 8. Entre a solução de custo 8 e a solução de custo 21, observa-se o mesmo, contudo com um valor menor para a relação entre a variação da quantidade de carga monitorada pela variação do custo do que no primeiro intervalo, ou seja, com uma pior (mas ainda interessante) relação de custo benefício. Após a solução de custo 21, não é possível melhorar significativamente o monitoramento das cargas, por mais que se aumente o investimento. O mesmo comportamento pode ser observado para o monitoramento dos ramais.

Figura 6.4: Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.

Quanto à ambiguidade topológica, observa-se que com 26 monitores a ambiguidade é igual a zero, e após este ponto não pode haver mais melhoria quanto a este critério. Quanto à cobertura dos afundamentos de tensão, percebe-se que existem soluções na região apontada como interessante que permitem perceber todos os afundamentos, e que existem soluções em

que a ocorrência de afundamento em uma barra não pode ser detectada. Além disso, percebe-se que é possível obter um aumento quase que linear da redundância da medida dos afundamentos com o aumento do investimento.

A Tabela 6.4 aponta algumas soluções com custo 8, próximas ao primeiro “joelho” das curvas dos objetivos de monitoramento das cargas e do monitoramento dos ramais. Apresenta também algumas soluções próximas à região de saturação destas duas curvas, além de soluções com custo igual a 26, com o qual é possível obter soluções em que não há ambiguidade topológica.

Caso a concessionária tenha recursos para investir na alocação de 8 monitores, as soluções de 1 a 4 da Tabela 6.4 são interessantes.

Comparando as soluções 1 e 2 da tabela apresentada, observa-se que a solução 1 permite monitorar diretamente uma quantidade menor de carga, contudo, os afundamentos de tensão em todas as barras podem ser percebidos. Já a solução 2 permite monitorar uma quantidade maior de carga que a solução 1 e apresenta uma redundância maior no monitoramento dos afundamentos. Contudo, existe uma barra na qual os afundamentos não serão percebidos pelo sistema de monitoramento. As soluções 1 e 2 possuem monitores alocados apenas nas cargas, enquanto as soluções 3 e 4 não monitoram nenhuma carga diretamente, apenas ramais. Além disso, as soluções 3 e 4 apresentam uma redundância maior no monitoramento dos afundamentos que as soluções 1 e 2.

Agora, comparando a solução 3 com a solução 4, percebe-se que a cobertura dos ramais é maior na solução 3. Entretanto, a solução 4 permite o monitoramento de todas as barras quanto a ocorrência dos afundamentos, enquanto a solução 3 não permite monitorar uma barra quanto a ocorrência dos afundamentos.

As soluções 5, 6 e 7, comparadas a seguir, têm custo igual a 22 e possibilitam a cobertura de todos os afundamentos. A solução 5 permite monitorar diretamente a maior quantidade de carga. No entanto, monitora menos ramais e possui menor redundância no monitoramento dos afundamentos. A solução 6 permite monitorar o maior número de ramais e apresenta a maior redundância no monitoramento dos afundamentos. No entanto, permite monitorar a menor quantidade de carga e possui a maior ambiguidade topológica. Já a solução 7 possui a menor ambiguidade, permite monitorar uma quantidade de carga próxima ao da solução 5, além de apresentar valores intermediários entre os das soluções 5 e 6 para o monitoramento dos ramais e para a redundância do monitoramento dos afundamentos.

Tabela 6.4: Algumas soluções consideradas atraentes do conjunto de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD de 37 barras, considerado a MTDf obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras, e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu. Nesta Tabela $f_1(x)$ é referente ao custo do monitoramento, $f_2(x)$ ao monitoramento das cargas, $f_3(x)$ ao monitoramento dos ramais, $f_4(x)$ à ambiguidade topológica, $f_5(x)$ aos afundamentos não monitorados e $f_6(x)$ à redundância do monitoramento dos afundamentos

Solução	Componentes Monitorados	$\min$ $f_1(x)$	$\max$ $f_2(x)$	$\max$ $f_3(x)$	$\min$ $f_4(x)$	$\min$ $f_5(x)$	$\max$ $f_6(x)$
1	$L_1, L_2, L_{23}, L_{54}, L_{50}, L_{56}, L_{59}, L_{61}$	8	1269	0	45	0	3,26
2	$L_2, L_6, L_8, L_{32}, L_{23}, L_{54}, L_{50}, L_{56}$	8	1446	0	47	1	3,74
3	$L_4, L_9, L_{27}, L_{11}, L_{29}, L_{16}, L_{18}, L_{21}$	8	0	69	47	1	4,69
4	$L_1, L_4, L_9, L_5, L_7, L_{27}, L_{11}, L_{29}$	8	0	55	49	0	4,74
5	$L_1, L_2, L_{10}, L_6, L_8, L_{16}, L_{15}, L_{17}, L_{34}, L_{32}, L_{43},$ $L_{45}, L_{20}, L_{25}, L_{23}, L_{47}, L_{54}, L_{50}, L_{52}, L_{56}, L_{59}, L_{61}$	22	2118	10	16	0	10,75
6	$L_1, L_4, L_9, L_{27}, L_{11}, L_8, L_{29}, L_{12}, L_{16}, L_{33}, L_{31},$ $L_{39}, L_{13}, L_{18}, L_{21}, L_{42}, L_{19}, L_{24}, L_{48}, L_{47}, L_{49}, L_{54}$	22	275	94	19	0	12,18
7	$L_1, L_2, L_{10}, L_{11}, L_6, L_8, L_{28}, L_{29}, L_{36}, L_{30}, L_{15},$ $L_{17}, L_{18}, L_{32}, L_{40}, L_{14}, L_{23}, L_{48}, L_{50}, L_{56}, L_{59}, L_{61}$	22	1980	29	10	0	11,51
8	$L_2, L_6, L_8, L_{28}, L_{36}, L_{37}, L_{12}, L_{30}, L_{41},$ $L_{17}, L_{34}, L_{32}, L_{42}, L_{40}, L_{14}, L_{43}, L_{45}, L_{20},$ $L_{23}, L_{48}, L_{47}, L_{54}, L_{50}, L_{52}, L_{56}, L_{59}$	26	2250	11	9	1	13,70
9	$L_1, L_4, L_9, L_{27}, L_{11}, L_6, L_{29}, L_{36}, L_{37},$ $L_{16}, L_{33}, L_{31}, L_{38}, L_{13}, L_{18}, L_{21}, L_{42}, L_{40},$ $L_{45}, L_{23}, L_{48}, L_{47}, L_{49}, L_{56}, L_{60}, L_{59}$	26	754	87	0	0	13,84
10	$L_1, L_4, L_9, L_5, L_{27}, L_{35}, L_{11}, L_{29}, L_{37},$ $L_{16}, L_{30}, L_{38}, L_{39}, L_{15}, L_{18}, L_{21}, L_{32}, L_{42},$ $L_{45}, L_{23}, L_{48}, L_{47}, L_{54}, L_{50}, L_{60}, L_{59}$	26	804	83	0	0	14,03
11	$L_1, L_4, L_9, L_{27}, L_{11}, L_8, L_{29}, L_{36}, L_{37},$ $L_{16}, L_{33}, L_{31}, L_{38}, L_{15}, L_{18}, L_{21}, L_{42}, L_{40},$ $L_{45}, L_{23}, L_{48}, L_{54}, L_{50}, L_{56}, L_{60}, L_{59}$	26	983	83	0	0	13,79
12	$L_1, L_4, L_9, L_{27}, L_{11}, L_8, L_{29}, L_{36}, L_{37},$ $L_{16}, L_{17}, L_{34}, L_{32}, L_{40}, L_{14}, L_{43}, L_{45}, L_{20},$ $L_{25}, L_{47}, L_{54}, L_{50}, L_{52}, L_{56}, L_{59}, L_{61}$	26	1374	61	0	0	13,51

As soluções de 8 a 12 possuem custo 26, com o qual é possível obter soluções com ambiguidade topológica igual a zero. Contudo, a solução 8 apresenta ambiguidade igual a 9, monitora diretamente uma carga igual a 2.250 kW, e 11 ramais, além de não permitir o monitoramento de afundamentos em apenas 1 barra e apresentar uma redundância de 13,7 no monitoramento dos afundamentos. Já as soluções de 9 a 12 não apresentam ambiguidade topológica e permitem a cobertura de todos os afundamentos de tensão. Contudo, apresentam diferentes valores de eficiência para os critérios de monitoramento de cargas, de ramais e de redundância no monitoramento dos afundamentos.

6.3 Resultados Obtidos para o Circuito Alimentador de 34 barras

O modelo proposto para alocação de monitores foi aplicado também ao circuito de 34 barras, considerando a ocorrência de curtos-circuitos francos em todas as barras do SD para a obtenção da MTDF, e um limiar de 0,9 pu de tensão remanescente para a obtenção da MC. Foi considerado, assim como nos demais sistemas, custo unitário para instalação dos monitores em qualquer componente do sistema.

Para os testes com o sistema de 34 barras, utilizou-se uma população inicial de 3.000 indivíduos. Este sistema possui 39 componentes (considerando o tronco do alimentador, ramais e cargas) que podem ser monitorados. Após 2.000 gerações, a fronteira de Pareto para este sistema é apresentada na Figura 6.5. Para o sistema de 34 é possível realizar análises semelhantes as realizadas para os demais casos de teste, principalmente às realizadas para o sistema de 37 barras.

Observando a Figura 6.5, observa-se que a relação entre a variação da quantidade de carga monitorada pela variação do custo (para a solução que monitora mais carga a um mesmo custo) apresenta um valor aproximadamente constante até a solução de custo 2. Entre a solução de custo 3 e a solução de custo 12, observa-se o mesmo, contudo com um valor menor para a relação entre a variação da quantidade de carga monitorada pela variação do custo que no primeiro intervalo, ou seja, com uma pior relação de custo benefício. Após a solução de custo 12, não é possível melhorar significativamente o monitoramento das cargas, por mais que se aumente o investimento. Para o monitoramento dos ramais, observa-se que a região de saturação, de sua relação com o custo, encontra-se próximo ao custo de 11 unidades. Quanto à ambiguidade topológica, observa-se que com 14 monitores a ambiguidade é igual a zero, e após este ponto

não pode haver mais melhoria quanto a este critério. Quanto à cobertura dos afundamentos de tensão, observa-se que existem soluções que permitem acurar todos os afundamentos, e que existem soluções em que a ocorrência de afundamento em até 3 barras não pode ser detectada.

Figura 6.5: Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 34 barras, considerando a MTDF obtida a partir de curtos-circuitos francos em todas as barras e a MC para um limiar de tensão de 0,9 pu.

Além disso, percebe-se que é possível obter um aumento quase que linear da redundância da medida dos afundamentos com o aumento do investimento.

6.4 Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura Correlata

Os autores Branco, Breda, Oleskovicz, Coury, e Delbem (2011) formularam o problema de alocação de monitores de QEE em sistemas de distribuição considerando somente aspectos topológicos. Foram considerados os mesmos aspectos topológicos considerados nesta tese, contudo, estes foram combinados em uma única função que determinava a qualidade do monitoramento. Desta forma, no referido trabalho o objetivo era maximizar a qualidade do monitoramento e minimizar o custo associado. No entanto, os autores não aplicaram um algoritmo multiobjetivo para obter a resposta, e sim uma função de ponderação que somava os dois objetivos considerando fatores de peso. Com a variação dos fatores de peso atribuídos a cada objetivo, foi possível obter uma fronteira de Pareto construída a partir de soluções não dominadas do problema. A Figura 6.6 apresenta os resultados obtidos pelos autores para o sistema de distribuição de 13 barras.

Figura 6.6: Fronteira de Pareto obtida utilizando uma função de ponderação para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras (Branco *et al.*, 2011).

Cabe lembrar um dos principais problemas que surgem da utilização de funções ponderadas para a resolução de problemas multiobjetivos: a perda de soluções eficientes. Observa-se na Figura 6.6 que a partir da solução de custo 8, a aplicação da função ponderação fica com-

prometida, pois a próxima resposta obtida por este método é a solução de custo 15, não sendo possível conhecer várias soluções atrativas neste intervalo. Além disso, a utilização de uma única função para representar a qualidade do monitoramento, combinando o monitoramento das cargas, o monitoramento dos ramais e o atendimento da lei das correntes de *Kirchhoff*, não permite obter informações importantes acerca das soluções. Por exemplo, os autores Branco *et al.* (2011) apontam que as soluções com custos entre 4 e 8 são as mais interessantes, não ocorrendo uma boa relação custo/benefício para soluções com custo maior que 8. Todavia, pelo modelo apresentado nesta tese, no qual os critérios topológicos são considerados como objetivos distintos, percebe-se, por exemplo, que a solução de custo 9 permite monitorar todo o SD de 13 barras, sem ambiguidade topológica.

A vantagem em utilizar um modelo como o proposto por Branco *et al.* (2011) está na facilidade de interpretar a fronteira de Pareto, uma vez que esta se apresenta em apenas 2 dimensões. Contudo, vale reforçar novamente que, pela abordagem de Branco *et al.* (2011), a representação de várias funções diferentes combinadas em uma única função pode acarretar em perda de soluções relevantes, como já exemplificado.

Na Figura 6.7 apresenta-se uma comparação entre o resultado obtido com a metodologia proposta neste trabalho e o resultado obtido por Branco *et al.* (2011) para alocação de monitores no SD de 13 barras. Os pontos em vermelho indicam os valores obtidos por cada solução obtida por Branco *et al.* (2011), quando estas são avaliadas pelas funções objetivos propostas nesta tese. Observa-se que as soluções obtidas por Branco *et al.* (2011) apresentam, como era de se esperar, valores intermediários para a avaliação dos aspectos topológicos, uma vez que na metodologia proposta por eles foi usada uma função que ponderava os objetivos relacionados aos aspectos topológicos. Observando a figura fica evidente que a metodologia proposta neste trabalho apresenta uma maior flexibilidade, uma vez que permite escolher entre soluções eficientes (representadas pelos pontos pretos) que atendam melhor um dos critério.

Figura 6.7: Comparação entre metodologias diferentes para resolução do problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 13 barras.

A Figura 6.8 apresenta a solução obtida por Branco *et al.* (2011) para o sistema de 37 barras. De acordo com a figura, e como exposto pelos autores, após a solução de custo 12 obtida pelo modelo proposto, a relação custo/benefício começa a se deteriorar, não sendo mais atrativo o investimento para um custo maior que 20. Com a utilização do modelo multiobjetivo proposto nesta tese foi possível obter soluções mais refinadas, e inclusive se percebeu que um

investimento maior que 20 unidades ainda se mostra atrativo. Observou-se que para soluções com custo entre 8 e 12 unidades, é possível obter um bom monitoramento para o critério das cargas ou para o monitoramento dos ramais. Já com custos por volta de 20 a 22 unidades é possível obter soluções que atendam bem os 3 critérios topológicos. Além disso, com um investimento de 26 unidades de custo, pode-se obter soluções em que não há ambiguidade topológica.

Figura 6.8: Fronteira de Pareto obtida utilizando uma função de ponderação para o problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras (Branco *et al.*, 2011).

Além das vantagens já apontadas do método proposto nesta tese, em comparação com a proposta apresentada em Branco *et al.* (2011), é possível apontar ainda as vantagens obtidas com a utilização das funções objetivos voltadas para o monitoramento dos afundamentos de tensão. Com o modelo aqui proposto, é possível escolher dentre as soluções não dominadas aquelas que permite a cobertura de todos os afundamentos, ou aquelas que minimizam os afundamentos que não podem ser cobertos, e ainda selecionar soluções que forneçam uma boa redundância na cobertura dos afundamentos.

Na Figura 6.9 é possível observar os valores das funções objetivo propostas neste trabalho obtidos pelas soluções apontadas por Branco *et al.* (2011) para o sistema de 37 barras. Observa-se que as soluções encontradas por Branco *et al.* (2011), indicadas em vermelho, apresentam valores intermediários para os objetivos quando comparadas às soluções encontradas pelo modelo aqui proposto, indicadas em preto.

Figura 6.9: Comparação entre metodologias diferentes para resolução do problema de alocação de monitores de QEE no sistema de distribuição de 37 barras.

Outro trabalho importante que abordou a alocação de monitores foi o apresentado por Won e Moon (2008), no qual também foi proposto um modelo de otimização baseado na topologia do SD. A proposta apresentada por Won e Moon (2008), também considerava uma função que combinava os objetivos topológicos, semelhante à adotada por Branco *et al.* (2011), contudo, utilizava também um índice que determinava o grau de ambiguidade para guiar o processo

de busca. Os autores em Won e Moon (2008) apontam como solução ótima para o SD de 37 barras um arranjo com 25 monitores, no qual o índice utilizado para apontar a ambiguidade do sistema seria zero. Contudo, cabe ressaltar que na solução apontada pelos autores ainda existe um componente ambíguo. O modelo proposto por Won e Moon (2008) não permite perceber, conforme observado na curva com as soluções encontradas, que alguns arranjos com 26 monitores têm ambiguidade igual a zero. Além disso, o modelo proposto por Won e Moon (2008) padece dos mesmos problemas apontados para o modelo proposto em (Branco *et al.*, 2011).

6.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o modelo multiobjetivo proposto para a alocação de monitores de QEE em sistemas de distribuição. O algoritmo empregado possibilitou a determinação do conjunto de soluções não dominadas para cada um dos testes realizados, apontando as soluções com melhores níveis de eficiência para cada custo considerado.

Como discutido, a modelagem multiobjetivo proposta agregou benefícios ao processo de decisão dos pontos que devem ser monitorados, permitindo uma análise da relação custo-benefício da instalação de novos monitores no sistema. Pelos resultados apresentados, justificou-se também que é essencial uma tomada de decisão, a figura de um decisor, que apontará a solução que deve ser adotada dentre as soluções não dominadas apresentadas como resposta do problema. Pela formulação do problema, percebe-se que a quantidade de soluções não dominadas pode ser muito grande o que, principalmente para sistemas de grande porte, acarretará na necessidade de uma ferramenta para auxiliar o decisor, ou para automatizar o processo de tomada de decisão.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões finais a respeito do que foi desenvolvido nesta tese, além de apresentar propostas de continuidade para a pesquisa.

Capítulo 7

Conclusões e Continuidade da Pesquisa

Neste documento foi abordado o tema da alocação otimizada de monitores, sendo proposto um modelo de otimização multiobjetivo para a alocação dos monitores de QEE em sistemas de distribuição. O modelo proposto é baseado na topologia do sistema e no monitoramento dos afundamentos de tensão, e tem por objetivo minimizar o custo associado ao sistema de monitoramento, maximizar a quantidade de cargas monitoradas, maximizar a quantidade de ramais laterais monitorados, minimizar a ambiguidade topológica, minimizar a quantidade de barras nas quais os afundamentos de tensão não podem ser detectados, e maximizar a redundância das medidas dos afundamentos de tensão.

Inicialmente foram levantados fatores que motivaram o desenvolvimento desta pesquisa, como a necessidade do monitoramento da QEE para possibilitar várias aplicações que permitiriam a melhoria dos índices de desempenho dos SD. Outro ponto de incentivo evidenciado é a possibilidade de um monitoramento distribuído, dispondo de canais de comunicação para a aquisição e troca de informações, o que traria grandes benefícios ao sistema elétrico como um todo. No contexto apresentado, buscou-se a distribuição, da melhor maneira possível, dos monitores de QEE pelo SD, sendo esta de vital importância para a manutenção e melhoria dos níveis de QEE.

Comentou-se sobre vários aspectos que podem ser observados para o estabelecimento do plano de monitoramento. A observação de determinados tipos de distúrbios de QEE, a presença de geração distribuída, localização de faltas e redundância de medidas são alguns destes. Devido à dificuldade de previsão da ocorrência dos distúrbios associados à falta de QEE, colocou-se que a observação simultânea de um conjunto destes aspectos pode fornecer soluções

mais adequadas para a alocação dos monitores. A consideração de vários aspectos permitiria, também, uma análise dos benefícios de um determinado arranjo em relação a outro.

Diante do exposto, fez-se a proposição de uma modelagem multiobjetivo para a alocação dos monitores em SD, baseada na topologia do sistema e nos aspectos relacionados ao monitoramento dos afundamentos de tensão. Para o estabelecimento do plano de monitoramento, a metodologia desenvolvida considera seis objetivos distintos: minimização do custo do monitoramento, minimização da ambiguidade topológica, maximização do monitoramento das cargas, maximização da quantidade de ramais monitorados, minimização da quantidade de afundamentos não monitorados, e maximização da redundância do monitoramento dos afundamentos.

Ainda em relação ao estabelecimento do plano de monitoramento, aplicou-se o método das posições de falta e o cálculo de curto-circuito, por meio do software DIgSILENT Power Factory, para a obtenção da matriz de tensões durante a falta, que possibilita perceber como se dá a propagação de um afundamento de tensão em um SD. A obtenção desta matriz foi importante para determinar os melhores pontos de instalação dos monitores, no que se refere à cobertura dos afundamentos de tensão.

Como ferramenta para a resolução do problema foi utilizado um algoritmo evolutivo, o AEMT. A escolha do AEMT, em particular, se deu pelo fato deste algoritmo apresentar bons resultados para diversas aplicações que lidam com muitos objetivos.

Para testar a metodologia proposta foram utilizados três sistemas de distribuição da base de dados do IEEE, com 13, 34 e 37 barras, respectivamente. Os resultados obtidos permitiram observar que o AEMT forneceu as fronteiras de Pareto com soluções diversificadas e bem distribuídas ao longo da mesma.

A discussão dos resultados apresentados permitiu observar as vantagens da abordagem proposta frente às outras propostas encontradas na literatura correlata. Com a adoção do modelo multiobjetivo apresentado foi possível observar que existem soluções que atendem melhor determinados critérios, considerando o mesmo valor de investimento. Portanto, esta abordagem permite uma maior flexibilidade para o estabelecimento do plano de monitoramento. Foi também evidenciado que com o modelo proposto é possível direcionar a alocação dos monitores para atender melhor um determinado critério de desempenho em detrimento a outros critérios, mantendo-se o custo constante, e sempre escolhendo soluções eficientes pertencentes à fronteira de Pareto. Esta possibilidade é uma vantagem da metodologia apresentada em relação

aos outros trabalhos, que apontam sistemas de monitoramento que são avaliados com valores intermediários para os critérios adotados nesta tese, e que não permitem tal flexibilidade.

Apesar da flexibilidade conseguida em virtude da obtenção da fronteira de Pareto, em algumas situações, a grande quantidade de soluções eficientes fornecidas pode ser vista como uma desvantagem. Isto ocorre porque após a obtenção da fronteira de Pareto, é necessário que um especialista atue para decidir qual solução será adotada. Contudo esta situação pode ser contornada com o desenvolvimento de um sistema de decisão automático.

Como apresentado, o fornecimento da fronteira de Pareto é de grande utilidade para o planejamento dos sistemas de monitoramento. De posse desta informação as empresas de energia podem melhor avaliar os investimentos que farão nos seus sistemas de monitoramento. Com a visualização da fronteira de Pareto é possível realizar um estudo de viabilidade do investimento e decidir até que ponto é vantajoso continuar investindo.

Esta é a maior contribuição deste trabalho: fornecer o melhor arranjo de monitores para uma variedade de diferentes custos, permitindo a avaliação da relação custo/benefício de cada investimento realizado. Caso seja considerado otimizar o sistema de monitoramento para determinados critérios, a abordagem multiobjetivo proporcionará a opção de direcionar o monitoramento para algum dos critérios, ou buscar um equilíbrio entre os diversos critérios que foram utilizados na modelagem do problema.

7.1 Continuidade da Pesquisa

Para o prosseguimento desta pesquisa um desdobramento de grande importância é o estudo e a proposição de uma ferramenta para a tomada de decisão, para responder em conjunto com o modelo proposto. Esta ferramenta deverá apontar a solução mais viável a ser utilizada, baseada nos critérios adotados por cada concessionária, ou então, reduzir a quantidade de soluções candidatas no contexto desejado.

Além disso, pode-se aprimorar a abordagem apresentada considerando o modelo topológico para os sistemas de distribuição, buscando a minimização da ambiguidade topológica mediante a reconfiguração do sistema de distribuição em análise.

No tocante ao monitoramento dos afundamentos de tensão, pretende-se estudar a aplicação de ferramentas estatísticas como a simulação (método) de Monte Carlo e *Bootstrapping* para determinar a impedância de falta, e o tipo de falta que devem ser aplicados no método de

posição de falta para a obtenção da MTDF.

Outra possibilidade de continuidade relevante é o desenvolvimento de um modelo que também contemple como objetivo, a localização das fontes de distorções harmônicas nos sistemas de distribuição.

Referências Bibliográficas

- Adra, S. F. e P. J. Fleming (2009). A diversity management operator for evolutionary many-objective optimisation. In *Evolutionary multi-criterion optimization*, pp. 81–94. Springer.
- Adra, S. F. e P. J. Fleming (2011). Diversity management in evolutionary many-objective optimization. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 15(2), 183–195.
- Almeida, C. F. M. e N. Kagan (2009). Allocation of Power Quality Monitors by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory. In *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, pp. 1–6. IEEE.
- Almeida, C. F. M. e N. Kagan (2011). Using Genetic Algorithms and Fuzzy Programming to Monitor Voltage Sags and Swells. *IEEE Intelligent Systems* 26(2), 46–53.
- Avendano-Mora, M., N. C. Woolley, e J. V. Milanovic (2010). On improvement of accuracy of optimal voltage sag monitoring programmes. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, pp. 1–6. IEEE.
- Back, T. e H. P. Schwefel (1996). Evolutionary computation: An overview. In *Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on*, pp. 20–29. IEEE.
- Becker, C., W. Braun Jr, K. Carrick, T. Diliberti, C. Grigg, J. Groesch, B. Hazen, T. Imel, D. Koval, D. Mueller, *et al.* (1994). Proposed chapter 9 for predicting voltage sags (dips) in revision to iee std 493, the gold book. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 30(3), 805–821.
- Bertziss, A. (1975). *Data structures: theory and practice*. Academic Press, London and New York.
- Bollen, M., M. Qader, e R. Allan (1998). Stochastic and statistical assessment of voltage dips. In *Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200)*, IEE Colloquium on, pp. 5–1. IET.
- Bollen, M. H. e I. Gu (2006). *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press.

- Bollen, M. H. J., J. Esteves, K. Brekke, K. Niall, e M. Delfanti (2012). Voltage quality monitoring, dips classification and responsibility sharing. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*, pp. 926–931. IEEE.
- Bosman, P. A. N. e D. Thierens (2002). Multi-objective optimization with diversity preserving mixture-based iterated density estimation evolutionary algorithms. *International Journal of Approximate Reasoning* 31(3), 259–289.
- Branco, H. M. G. C., J. F. D. Breda, M. Oleskovicz, D. V. Coury, e A. C. B. Delbem (2011). Alocação Ótima de Monitores de Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição. In *Congresso Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica*. SBQEE.
- Byman, B., T. Yarborough, R. Schnorr Von Carolsfeld, e J. Van Gorp (2000). Using distributed power quality monitoring for better electrical system management. *IEEE Transactions on Industry Applications* 36(5), 1481–1485.
- Carpinelli, G., C. Di Perna, P. Caramia, P. Varilone, e P. Verde (2009). Methods for assessing the robustness of electrical power systems against voltage dips. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 24(1), 43–51.
- Cebrian, J. C., C. F. M. Almeida, e N. Kagan (2010). Genetic algorithms applied for the optimal allocation of power quality monitors in distribution networks. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, pp. 1–10. IEEE.
- Coello, C. a. (2000). An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys* 32(2), 109–143.
- Colnago, G. P., J. L. F. Vieira, G. C. D. Sousa, e J. R. Macedo (2010). Power quality real-time Monitoring System for the new Brazilian standard. In *Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, pp. 35–42. IEEE.
- Conrad, L., K. Little, e C. Grigg (1991). Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 27(1), 167–172.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Volume 16. Wiley.
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, e T. Meyarivan (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6(2), 182–197.

-
- Delbem, A. C. B., A. C. de Carvalho, e N. G. Bretas (2005). Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration. *Power Systems, IEEE Transactions on* 20(1), 425–436.
- DIGSILENT (2010). Power system analysis software. *DIGSILENT PowerFactory Version*.
- Dugan, R. C., S. Santoso, M. F. McGranaghan, e H. W. Beaty (2003). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill Professional.
- Eldery, M. A., E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, e A. Vannelli (2006). A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery* 21(2), 768–777.
- Eldery, M. A., F. El-Saadany, e M. M. A. Salama (2004). Optimum number and location of power quality monitors. In *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, pp. 50–57. Ieee.
- Eskandari, H. e C. D. Geiger (2009). Evolutionary multiobjective optimization in noisy problem environments. *Journal of Heuristics* 15(6), 559–595.
- Espinosa-Juarez, E. e A. Hernandez (2007). A Method for Voltage Sag State Estimation in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* 22(4), 2517–2526.
- Espinosa-Juarez, E., A. Hernandez, e G. Olguin (2009). An Approach Based on Analytical Expressions for Optimal Location of Voltage Sags Monitors. *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(4), 2034–2042.
- Espinosa-Juarez, E., J. Lucio, e A. Hernandez (2009). Analysis of Distributed Generation Impact on the Optimal Location of Voltage Sag Monitors by Applying Genetic Algorithms. In *2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, pp. 107–112. IEEE.
- Esteves, J., K. Brekke, K. Niall, M. Delfanti, e M. Bollen (2011). Voltage quality monitoring, dips classification and responsibility sharing. In *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, pp. 1–6. IEEE.
- Fonseca, C. M. e P. J. Fleming (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. In *Proceedings of the fifth international conference on genetic algorithms*, Volume 1, pp. 416. San Mateo, California.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Professional.

- Goswami, A. K., C. P. Gupta, e G. K. Singh (2008a). An analytical approach for stochastic assessment of voltage sags in distribution systems. In *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–6. Ieee.
- Goswami, A. K., C. P. Gupta, e G. K. Singh (2008b). Area of vulnerability for prediction of voltage sags by an analytical method in indian distribution systems. In *2008 Annual IEEE India Conference*, pp. 406–411. Ieee.
- Goswami, A. K., C. P. Gupta, e G. K. Singh (2009). An analytical approach for assessment of voltage sags. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 31(7-8), 418–426.
- Guerra, W. e N. Kagan (2009). Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms. In *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, pp. 1–5. IEEE.
- Hagbabin, M. e E. Farjah (2009). Optimal placement of monitors in transmission systems using fuzzy boundaries for voltage sag assessment. In *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1–6. IEEE.
- Hong, Y. Y. e Y. Y. Chen (2011). Placement of power quality monitors using enhanced genetic algorithm and wavelet transform. *IET Generation, Transmission & Distribution* 5(4), 461.
- Ibrahim, A. A., A. Mohamed, e H. Shareef (2011). Optimal placement of power quality monitors in distribution systems using the topological monitor reach area. In *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 394–399. IEEE.
- Ishibuchi, H., Y. Sakane, N. Tsukamoto, e Y. Nojima (2009). Adaptation of scalarizing functions in moea/d: An adaptive scalarizing function-based multiobjective evolutionary algorithm. In *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp. 438–452. Springer.
- Kagan, N., E. J. Robba, e H. P. Schmidt (2009). Estimaco de indicadores de qualidade da energia eltrica. *Editora Blucher*.
- Kempner, T. R. (2012). A Robustez de um sistema de distribuio e a alocao de medidores de qualidade da energia eltrica frente aos afundamentos de tenso. Dissertao de Mestrado, Escola de Engenharia de So Carlos, Universidade de So Paulo.
- Kersting, W. (2001). Radial distribution test feeders. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Volume 2*, pp. 908–912. IEEE.

-
- Kuk, H. (2002). NONLINEAR MULTIOBJECTIVE PROGRAMMING. *Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys*, 71.
- McGranaghan, M. F., D. R. Mueller, e M. J. Samotyj (1993). Voltage sags in industrial systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 29(2), 397–403.
- Moaddabi, N., S. H. H. Sadeghi, e H. Askarian Abyaneh (2008). Minimization of monitoring locations for detection of flicker sources by the direction of propagation method. In *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, pp. 307–312. IEEE.
- Moreno-Munoz, A. e J. Gonzalez De La Rosa (2008). Integrating power quality to automated meter reading. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 2(2), 10–18.
- Muscas, C., L. Peretto, S. Sulis, e R. Tinarelli (2004). Implementation of multi-point measurement techniques for PQ monitoring. In *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, pp. 1626–1631. Ieee.
- Muscas, C., F. Pilo, G. Pisano, e S. Sulis (2006). Optimal Placement of Measurement Devices in Electric Distribution Systems. In *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pp. 1873–1878. Ieee.
- Muscas, C., F. Pilo, G. Pisano, e S. Sulis (2007). Optimal measurement devices allocation for harmonic state estimation considering parameters uncertainty in distribution networks. In *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, pp. 1–6. IEEE.
- Olguin, G. (2005). An Optimal Trade-off between Monitoring and Simulation for Voltage Dip Characterization of Transmission Systems. In *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–6. Ieee.
- Olguin, G., M. Aedo, M. Arias, e a. Ortiz (2005). A Monte Carlo Simulation Approach to the Method of Fault Positions for Stochastic Assessment of Voltage Dips (Sags). In *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–6. Ieee.
- Olguin, G. e M. H. J. Bollen (2003a). Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system. In *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, pp. 2484–2490. Ieee.
- Olguin, G. e M. H. J. Bollen (2003b). Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,,* pp. 647–654. Ieee.

- Olguin, G., D. Karlsson, e R. Leborgne (2005). Stochastic assessment of voltage dips (Sags): The method of fault positions versus a Monte Carlo simulation approach. In *2005 IEEE Russia Power Tech*, pp. 1–7. Ieee.
- Olguin, G., F. Vuinovich, e M. H. J. Bollen (2006). An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes. *IEEE Transactions on Power Systems* 21(1), 378–384.
- Pelikan, M., K. Sastry, e D. E. Goldberg (2005). Multiobjective hboa, clustering, and scalability. In *Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 663–670. ACM.
- Pema, C. D., G. Olguin, P. Verde, e M. H. J. Bollen (2004). On Probabilistic System Indices for Voltage Dips. In *8' International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, September 12-16,2004*, pp. 796–800.
- Reis, D. C. S., P. R. C. Villela, C. A. Duque, e P. Ribeiro (2008). Transmission systems power quality monitors allocation. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–7. IEEE.
- Salim, F. e K. M. Nor (2008). Optimal voltage sag monitor locations. In *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities*, pp. 1–6.
- Salim, F. e K. M. Nor (2010). Voltage sags observation through optimal monitor locations. In *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*.
- Santos, A. C., A. C. B. Delbem, J. B. A. London, e N. G. Bretas (2010). Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. *Power Systems, IEEE Transactions on* 25(3), 1254–1265.
- Santoso, S., H. W. Beaty, R. C. Dugan, e M. F. McGranaghan (2002). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill Professional.
- Sastry, K., M. Pelikan, e D. E. Goldberg (2005). Decomposable problems, niching, and scalability of multiobjective estimation of distribution algorithms. *Arxiv preprint cs/0502057*.
- Schaffer, J. D. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In *Proceedings of the 1st international Conference on Genetic Algorithms*, pp. 93–100. L. Erlbaum Associates Inc.
- Srinivas, N. e K. Deb (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation* 2(3), 221–248.

-
- Tang, Y., J. Zhang, e P. Li (2010). The research of distributed power quality on-line monitoring system based on GRPS. In *2010 IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences*, pp. 384–387. IEEE.
- Wang, J., S. Chen, e T. Lie (2005). System voltage sag performance estimation. *Power Delivery, IEEE Transactions on* 20(2), 1738–1747.
- Won, D.-J., I.-Y. Chung, J.-M. Kim, S.-I. Moon, J.-C. Seo, e J.-W. Choe (2006). A New Algorithm to Locate Power-Quality Event Source With Improved Realization of Distributed Monitoring Scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery* 21(3), 1641–1647.
- Won, D.-J. e S.-I. Moon (2008). Optimal Number and Locations of Power Quality Monitors Considering System Topology. *IEEE Transactions on Power Delivery* 23(1), 288–295.
- Yi, X., O. Sen, e C. Xia (2010). Design and Realization of an Online Power Quality Monitoring System Based on GPRS. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–4. IEEE.
- Zitzler, E., M. Laumanns, L. Thiele, E. Zitzler, E. Zitzler, L. Thiele, e L. Thiele (2001). Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm.