

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de
Geração Distribuída às Redes de Distribuição”**

RENAN SILVA MACIEL

Orientador: Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

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

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Fevereiro/2012

FICHA CATALOGRÁFICA

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

M152o Maciel, Renan Silva.
Otimização multiobjetivo na análise da integração de geração distribuída às redes de distribuição / Renan Silva Maciel. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012.
144 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: Antonio Padilha Feltrin
Inclui bibliografia

1. Geração distribuída. 2. Meta-heurísticas de otimização multiobjetivo. 3. Energia elétrica – Distribuição. 4. Planejamento da expansão das redes de distribuição de média tensão.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de Geração Distribuída às Redes de Distribuição

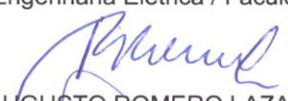
AUTOR: RENAN SILVA MACIEL

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

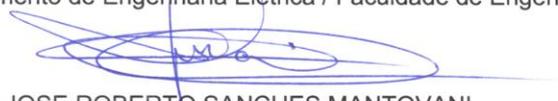
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EDGAR MANUEL CARREÑO FRANCO

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual do Oeste do Paraná


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CASTRO JUNIOR

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 23 de fevereiro de 2012.

À Thais e à Cecília.

Agradecimentos

Ao professor Antonio Padilha Feltrin que ao longo desses anos de pesquisa tem sido uma importante referência na minha formação acadêmica. Agradeço especialmente no desenvolvimento desta tese pela confiança em mim depositada, pela orientação competente, pela paciência e diligência na condução dos trabalhos e amizade.

Ao professor Vladimiro Miranda, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e diretor do INESC Porto, Portugal, pela valiosa oportunidade de desenvolver parte do doutorado nessa instituição sob sua orientação, por todas as contribuições para esta tese e pela acolhida no Porto.

Aos professores José Roberto Sanches Mantovani e Rubén Augusto Romero Lázaro primeiramente como aluno e depois pelas valiosas contribuições que pude colher tanto informalmente quanto ao longo das etapas deste doutorado: Estudos Especiais, Exame Geral de Qualificação e finalmente na defesa da tese.

Ao professor Mauro Augusto da Rosa, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e do INESC Porto, amigo e competente colega de trabalho, que sempre colaborou prontamente no decorrer desta pesquisa.

Aos professores Carlos Alberto Castro Junior e Edgar Manuel Carreño Franco por aceitarem participar da defesa desta tese de doutorado, contribuindo com uma leitura atenta e crítica desta e com prestimosas sugestões.

Aos colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE) pelo bom ambiente de convivência e particularmente aos que colaboraram de forma direta neste trabalho, dentre os quais deve ser mencionado o professor Luis Fernando Ochoa Pizzali pela cooperação sempre acessível e abalizada.

Aos colegas da Unidade de Sistemas de Energia do INESC Porto com os quais muito aprendi e tive o prazer de conviver durante o período de Doutorado Sanduíche, nomeadamente o Diego, o Jean, o Hrvoje, o Leonardo e o Leonel.

Aos professores da Faculdade de Engenharia da UNESP de Ilha Solteira, e de forma especial aos docentes do Departamento de Engenharia Elétrica. Agradeço ainda ao professor Edison Righetto pela amizade e por colaborar na minha iniciação na pesquisa científica.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia da UNESP de Ilha Solteira, principalmente àqueles do Departamento de Engenharia Elétrica, da Seção de Pós-Graduação e da Biblioteca.

Aos amigos que muito me honram e dos quais recebo imerecida fidelidade e estima. Gostaria de lembrar as preciosas amizades que fiz no GOU Angelus (Grupo de Oração Universitário) e alguns nomes como o Diego Feitosa, o Leandro Costa, o Rogério Silva, o Ricardo Rangel e a Silvia Costa. Há enfim tantos que mereceriam lembrança aqui aos quais peço apenas que recebam minha sincera gratidão.

Ao apoio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através de bolsa de doutorado direto (processo 2006/06758-9) e da CAPES pela bolsa do Programa de Doutorado no Brasil com Estágio no Exterior (processo PDEE 0694/09-6).

Àqueles que com amor e compreensão me acompanham incessantemente: meus pais, Jorge e Rosane, minha irmã Bianca, minha esposa Thais e minha filha Cecília. Recebam minha profunda gratidão e reconhecimento.

A Deus, fonte e fim último de toda boa inspiração e justo esforço. Dentre os amigos, o mais fiel. Dentre os mestres, o mais sábio.

Resumo

Dentre as profundas mudanças que os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm experimentando nas últimas décadas, a crescente penetração da Geração Distribuída (GD) representa ainda uma série de desafios técnicos para as redes de distribuição tradicionalmente concebidas. Essa tendência na alteração do paradigma de concepção, planejamento e operação das redes de distribuição de energia elétrica tem suscitado a necessidade de inovação nas metodologias e ferramentas computacionais de análise. Assim, este trabalho procura investigar as potencialidades das meta-heurísticas de otimização multiobjetivo (OM) como ferramenta para a análise de impacto da penetração da GD nas redes de distribuição de média tensão. Esse esforço pode ser dividido em duas etapas: a primeira concentrada sobre as técnicas de solução de modelos de OM e a segunda dirigida para o estudo do impacto causado pela GD em aspectos técnicos da rede de distribuição, como nível de tensão, curto-circuito e capacidade, considerando-se o problema de planejamento da expansão das redes de distribuição. Quanto ao estudo das técnicas de OM, fez-se um conjunto de investigações sobre os conceitos de otimização multiobjetivo, os principais métodos baseados em meta-heurísticas e na aplicação de OM a problemas de sistemas de potência, especialmente os relacionados à inserção da GD nas redes de distribuição. Foram implementados os métodos *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), baseado em Algoritmos Genéticos, e Busca Tabu multiobjetivo (BTMO). Finalmente, desenvolveu-se no âmbito desta tese o algoritmo *Multi-objective Evolutionary Particle Swarm Optimization* (MEPSO) com o objetivo de explorar os ganhos de desempenho verificados com a meta-heurística híbrida *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO) em problemas de otimização mono-objetivo. Com relação ao estudo de impacto da GD, foi apresentada uma metodologia que consiste numa análise da fronteira de Pareto (FP) que permite, além da obtenção das condições de melhor compromisso, a identificação de padrões de impacto da GD com relação a características das unidades geradoras como posição e capacidade, por exemplo. Uma vez apresentada a metodologia, segue-se a definição de dois modelos de OM: um modelo simplificado do problema de alocação e dimensionamento ótimos da GD e outro que visa a investigar a possibilidade de ganhos de capacidade na rede e adiamento dos investimentos em infraestrutura. A partir do primeiro desses modelos, foram feitos testes para a definição de estruturas e parâmetros do método MEPSO e comparados os métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO, com especial destaque para o desempenho deste último. Então, a metodologia de análise de impacto proposta foi aplicada a ambos os modelos permitindo observar como ocorre o impacto da GD sobre os objetivos técnicos definidos com relação à localização e injeção de potência das unidades geradoras. Enquanto as análises utilizando o primeiro modelo mostram-se limitadas a condições de penetração da GD controlada pelas concessionárias, os resultados obtidos com o segundo modelo mostram as condições extremas de impacto positivo e negativo que podem ser causados pela GD sobre a capacidade da rede, sendo indicadas medidas que visam a assegurar que investimentos em infraestrutura sejam postergados com a integração da geração. O conjunto de informações obtido a partir dessa análise pode ser utilizado como um estudo de impacto da GD, na avaliação do investimento na geração por parte da concessionária para a adequação da rede ou mesmo ser aproveitado no problema de planejamento da expansão, num contexto em que a concessionária não dispõe de controle sobre o acesso da GD à rede de distribuição. Acerca do método MEPSO, pôde-se verificar que apresentou desempenho destacado com relação aos métodos NSGA-II e BTMO, considerando o problema de OM resolvido nesta tese. Um conjunto mais amplo de

experimentos deve ser realizado para determinar se esse desempenho é mantido para problemas com características distintas.

Palavras-chave: Geração distribuída. Meta-heurísticas de otimização multiobjetivo. Planejamento da expansão das redes de distribuição de média tensão.

Abstract

The Distributed Generation (DG) plays an important role in the profound changes that distribution power systems are facing in the last decades. The impacts caused by high DG penetration are still a challenge for traditional distribution networks. Then, there is a need for innovation and development of computational tools for system analysis considering the new trends for designing, planning and operating distribution networks. This work investigates the potential of meta-heuristics for multi-objective optimization (MO) to evaluate the impact of the penetration of DG in medium voltage distribution networks. The research may be divided in two parts: firstly, the study is focused on the techniques for solving MO problems and the second part aimed to evaluate the impact of DG on technical aspects of the distribution network, such as voltage levels, short-circuit and current capacity, considering the problem of expansion planning of the distribution network. Regarding the study of the techniques of MO, the concepts of multi-objective optimization was investigated as well as the main meta-heuristic based methods and the application of the MO to power systems problems, especially those related to the integration of DG in distribution. Two methods were implemented: the Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), based on Genetic Algorithms and a multi-objective Tabu Search (MOTS). Finally, the algorithm of a Multi-objective Evolutionary Particle Swarm Optimization (MEPSO) was developed within this thesis in order to exploit the performance gains observed with the hybrid meta-heuristic Evolutionary Particle Swarm Optimization (EPSO) in single-objective optimization problems. Concerning the study of the impact of DG, a methodology for analysis of the Pareto front was proposed which allows, in addition to obtaining the best trade-off solutions, the identification of patterns of DG impact related to elements such as the position and the size of the generation units. Two models of MO were defined: a simplified model for optimal allocation and sizing of DG and a model used for investigating the possibility of gains in network capacity and deferment of investments in network infrastructure. Using the first of these models, the parameters and structures of the MEPSO method were tested and the NSGA-II, MOTS and MEPSO methods were compared. The MEPSO methods presented a generally better performance than NSGA-II and MOTS methods. Then, the proposed methodology for impact analysis was applied to both models showing the relation between the DG impact on the technical indices and the location and size of the generation units. The analysis performed with the first model presented conclusions limited to cases where the penetration of DG is controlled by the distribution companies. The results obtained with the second model showed the extremes of positive and negative impacts that may be caused by DG on the capacity of the network. Conditions for connecting the DG were also identified to ensure the investment deferral with the integration of the generators. The information this analysis can be used for an impact study of DG, to evaluate the investment in generation by the utilities for the adequacy of the system or even be used in the expansion planning where the generators have free access to the distribution network. About MO techniques, MEPSO method presented remarkable performance compared to NSGA-II and BTMO methods, considering the problem of MO resolved in this thesis. However, a broader set of experiments should be conducted to determine whether this performance is maintained for problems with different characteristics.

Keywords: Distributed generation. Multi-objective optimization meta-heuristics. Planning of MV distribution networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação das perdas totais da rede com a potência injetada pelo gerador distribuído.....	34
Figura 2 – Perfil das correntes de curto-circuito para uma rede aérea de distribuição.	35
Figura 3 – Estrutura básica da otimização mono e multiobjetivo.	38
Figura 4 – Mapeamento das variáveis de decisão no espaço das funções objetivo.	40
Figura 5 – Representação do vetor ideal nos espaço das funções objetivo para $k = 2$	42
Figura 6 – Ilustração dos conceitos de dominância e otimalidade de Pareto.	42
Figura 7 – Procedimento do método NSGA-II.	49
Figura 8 – Fluxograma do método NSGA-II em que NP_{t+1} é a dimensão da população P_{t+1} e NF_i é a dimensão da fronteira F_i	50
Figura 9 – Fluxograma do método BTMO.	53
Figura 10 – Fluxograma do método MEPSO, sendo NEP_t a dimensão do enxame de partículas EP_t	58
Figura 11 – Estrutura de atribuição do Gb para o método MEPSO.	61
Figura 12 – Síntese da metodologia multiobjetivo de análise de impacto da GD.....	65
Figura 13 – Conjunto de todas soluções e subconjunto das soluções factíveis para a rede RDMT123.....	72
Figura 14 – Conjunto de todas soluções e subconjunto das soluções factíveis para a rede RDMT34.....	73
Figura 15 – Exemplo de codificação para o modelo de alocação ótima da GD.....	74
Figura 16 – Exemplo de codificação alternativa para o modelo de alocação ótima da GD.....	74
Figura 17 – Vetor de codificação das variáveis de decisão para o problema de avaliação de impacto da GD sobre a capacidade da rede.....	79
Figura 18 – Configurações antes do processo de recombinação.....	83
Figura 19 – Configurações descendentes pela operação de recombinação.....	84
Figura 20 – Exemplo de processo de mutação.....	84
Figura 21 – Rede elétrica RDMT123, adaptada de IEEE-123.....	86
Figura 22 – Rede elétrica RDMT34, adaptada de IEEE-34.....	87
Figura 23 – Potência ativa trifásica para cada barra da rede RDMT34.	88
Figura 24 – Potência ativa trifásica para cada barra da rede RDMT123.	88
Figura 25 – Perfil de tensão da rede RDMT34.	89
Figura 26 – Perfil de tensão da rede RDMT123.	89
Figura 27 – Avaliação das metodologias de atribuição do Gb para o caso CONS123.	92
Figura 28 – Avaliação das metodologias de atribuição do Gb para o caso CONS34.	93
Figura 29 – Avaliação das metodologias de atribuição do Gb para o caso UNCONS34.	94
Figura 30 – Avaliação das metodologias de atribuição do Gb para o caso UNCONS123.	94

Figura 31 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do Gb para caso CONS123.....	95
Figura 32 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do Gb para caso CONS34.....	96
Figura 33 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do Gb para caso UNCONS34.....	97
Figura 34 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do Gb para caso UNCONS123.....	98
Figura 35 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso CONS123.....	100
Figura 36 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso CONS34.....	100
Figura 37 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS34.....	101
Figura 38 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS123.....	101
Figura 39 – Resultados obtidos pelo método BTMO considerando quatro casos e como solução final LP e LC combinados.	103
Figura 40 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS34 com critério de parada de 80%.....	104
Figura 41 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS123 com critério de parada de 80%.....	104
Figura 42 – Fronteiras de Pareto para as redes RDMT34 e RDMT123 com e sem as restrições de tensão e corrente.....	107
Figura 43 – Rede RDMT123 adaptada com as zonas de conexão da GD baseado na FP restrita.	109
Figura 44 – Vetor ideal e <i>knee set</i> , para os valores dos objetivos normalizados, considerando a rede RDMT34.....	111
Figura 45 – Rede RDMT34 adaptada com as zonas de conexão da GD baseado na FP restrita.	111
Figura 46 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC, max PEN – max IC, min PEN – min IC e max PEN – min IC, com e sem a restrição de tensão para a rede RDMT34. ...	115
Figura 47 – Esboço das regiões definidas pelas fronteiras de Pareto para a rede RDMT34.....	115
Figura 48 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC e max PEN – max IC para a rede RDMT123.....	117
Figura 49 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC, max PEN – max IC, min PEN – min IC e max PEN – min IC, com e sem a restrição de tensão para a rede RDMT123. .	118
Figura 50 – Fronteiras de Pareto para a rede RDMT123 sem a conexão da Geração Distribuída nos nós de trechos subterrâneos da rede.....	119

Figura 51 – Proposta de divisão da rede RDMT123 em zonas para conexão da Geração Distribuída.	120
Figura 52 – Fronteiras de Pareto em detalhe para: (a) nível de penetração mínimo de 25%; e (b) nível de penetração mínimo de 35%.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas tecnologias de geração distribuída, com informações de capacidade e interface de conexão.	27
Tabela 2 – Nível de penetração da GD por fase e total para cada rede elétrica.	71
Tabela 3 – Resumo dos dados das redes elétricas, testes e espaço de busca.	71
Tabela 4 – Carga total por fase para as redes elétricas RDMT34 e RDMT123.	87
Tabela 5 – Ramos da rede RDMT123 com sobrecarga.	90
Tabela 6 – Valores de cardinalidade e da métrica Δ associados à FP para todos os casos.	90
Tabela 7 – Parâmetros definidos para os métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO.	99
Tabela 8 – Número de unidades de GD, máxima e mínima geração permitidas e IC para as redes elétricas sem GD.	114
Tabela 9 – Dados de carga do alimentador RDMT34.	136
Tabela 10 – Dados dos capacitores do alimentador RDMT34.	136
Tabela 11 – Dados de linha do alimentador RDMT34.	137
Tabela 12 – Dados de carga do alimentador RDMT123.	139
Tabela 13 – Dados dos capacitores do alimentador RDMT123.	140
Tabela 14 – Dados de linha do alimentador RDMT123.	141

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	<i>Otimização multiobjetivo na análise da integração de Geração Distribuída às redes de distribuição</i>	16
1.2	<i>Revisão do estado da arte</i>	18
1.3	<i>Estrutura da tese</i>	21
2	Geração Distribuída e impacto da integração da geração nas redes de distribuição	23
2.1	<i>Geração Distribuída</i>	23
2.1.1	<i>Tecnologias de Geração Distribuída</i>	24
2.1.2	<i>Conceitos e tendências relacionadas à Geração Distribuída.....</i>	27
2.2	<i>Características tradicionais das redes de distribuição e Geração Distribuída.....</i>	28
2.2.1	<i>Os impactos da Geração Distribuída</i>	29
2.2.2	<i>Propriedade da Geração Distribuída por parte das concessionárias.....</i>	35
3	Otimização Multiobjetivo.....	37
3.1	<i>Conceitos e Definições</i>	37
3.2	<i>Visão geral das metodologias de otimização multiobjetivo.....</i>	43
3.2.1	<i>Desenvolvimento dos métodos de otimização multiobjetivo</i>	43
3.2.2	<i>Classificação dos métodos de otimização multiobjetivo quanto à tomada de decisão.....</i>	45
3.3	<i>Análise de resultados</i>	46
3.4	<i>Meta-heurísticas de otimização multiobjetivo implementadas</i>	47
3.4.1	<i>Método NSGA-II</i>	47
3.4.2	<i>Método Busca Tabu Multiobjetivo (BTMO)</i>	51
4	Proposta: método EPSO Multiobjetivo (MEPSO).....	54
4.1	<i>O método EPSO</i>	54
4.2	<i>O método MEPSO</i>	56
4.2.1	<i>Inicialização.....</i>	59
4.2.2	<i>Classificação da população em diferentes níveis segundo a dominância</i>	59
4.2.3	<i>Atualização da Lista de Pareto (lista externa)</i>	59
4.2.4	<i>Atribuição de Gb.....</i>	59
4.2.5	<i>Definição do Pb</i>	62
4.2.6	<i>Seleção</i>	62
4.2.7	<i>Discussão sobre o MEPSO</i>	62

5	Metodologia e Modelos de Otimização Multiobjetivo para Avaliar o Impacto da Geração Distribuída.....	64
5.1	<i>Metodologia de avaliação de impacto da GD baseada na avaliação da fronteira de Pareto ..</i>	64
5.2	<i>Modelos de OM para a avaliação de impacto da GD.....</i>	67
5.2.1	<i>Modelo para o problema de alocação ótima da Geração Distribuída.....</i>	68
5.2.2	<i>Modelo para a análise de impacto da Geração Distribuída sobre a capacidade da rede</i>	75
5.3	<i>Metodologia para avaliação de desempenho das meta-heurísticas de OM.....</i>	79
5.4	<i>Ferramentas computacionais de cálculos elétricos</i>	82
6	Testes e resultados.....	83
6.1	<i>Detalhes adicionais de implementação e considerações para os testes</i>	83
6.1.1	<i>Operadores genéticos do método NSGA-II.....</i>	83
6.1.2	<i>Tratamento de infeasibilidades</i>	84
6.1.3	<i>Redes teste.....</i>	85
6.2	<i>Análise dos métodos de Otimização Multiobjetivo</i>	90
6.2.1	<i>Testes relativos ao método MEPSO</i>	91
6.2.2	<i>Estudo comparativo entre os métodos</i>	98
6.3	<i>Análise de alocação ótima da Geração Distribuída utilizando Otimização Multiobjetivo</i>	107
6.3.1	<i>Discussão sobre a análise de alocação ótima da Geração Distribuída utilizando Otimização Multiobjetivo</i>	112
6.4	<i>Análise de impacto da GD com relação à capacidade e possibilidade de adiar investimentos na rede</i>	114
6.4.1	<i>Discussão sobre a metodologia de análise de impacto da GD com relação à capacidade e possibilidade de adiar investimentos na rede</i>	121
7	Conclusões.....	124
8	Desenvolvimentos futuros.....	127
	Referências.....	128
	ANEXO A – Dados do Alimentador Teste RDMT34	135
	ANEXO B – Dados do Alimentador Teste RDMT123.....	138

1 Introdução

Os impactos da geração distribuída (GD) sobre a rede elétrica de distribuição são amplamente abordados e muitos já bem reconhecidos na literatura. Sabe-se que, do ponto de vista técnico, a introdução de unidades geradoras em redes tradicionalmente concebidas para acomodar somente cargas pode ter tanto efeito benéfico como prejudicial, o que depende do relacionamento de vários fatores. Assim, o planejamento da expansão das redes de distribuição nesse contexto torna-se uma tarefa altamente complexa. Mesmo o processo tradicional de planejamento da expansão apresenta elevada complexidade devido a características como conflito de objetivos, um grande número de variáveis, natureza dinâmica do problema, as incertezas e os elevados investimentos envolvidos (NEIMANE, 2001). Tais desafios não só permanecem como são intensificados na presença da GD.

Um estudo europeu (EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION, 2006), tomando três países como referência (Itália, Países Baixos e Suécia), apontou incipiente ou mesmo ausente a prática de planejamento da rede elétrica levando em consideração a GD. Além de ser identificada uma relutância tradicional no setor quanto à integração da GD, no contexto europeu (EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION, 2007) a regulamentação que visa a estabelecer mercados de energia pode ser uma das principais causas de que seja, em geral, ignorada no planejamento a geração como alternativa. Isso porque é de fundamental importância para o estabelecimento da estrutura de mercado que haja a separação das entidades responsáveis pelas atividades de geração, transmissão e distribuição o que pode coibir, no entanto, a propriedade da GD por parte das concessionárias. Isso faz com que a rede possa operar de forma ineficiente e não contribui para o aproveitamento dos possíveis benefícios da GD, sendo quase que exclusivamente o investimento em infraestrutura de rede a alternativa de expansão ou adequação.

Já a regulamentação nos EUA (SIANO et al., 2009), permite que as companhias de distribuição instalem convenientemente geradores na rede como forma de adiar investimentos ou ainda ofereçam incentivos à conexão de GD pertencente a terceiros em localizações convenientes.

No Brasil, é assegurado o livre acesso dos geradores à rede de distribuição e a regulamentação não impede as concessionárias de serem proprietárias de unidades geradoras. Nos Procedimentos de Distribuição (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2011c) está estabelecido que o planejamento da expansão deve considerar a GD,

inclusive nos estudos de previsão da demanda nos níveis de alta e média tensão de distribuição. Porém, em consulta pública com o objetivo de reduzir as barreiras para a instalação da GD nas redes de distribuição (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2011a), que recebeu contribuições de diferentes agentes interessados no tema, os representantes das distribuidoras apontaram uma série de questões técnicas que entendem como não superadas e constituem barreiras para a maior integração da GD nas redes de distribuição de baixa e média tensão.

Dada, portanto, a natureza complexa do problema, diferenças de paradigmas existentes e seus desdobramentos, como os conceitos de redes inteligentes (*Smart Grids*) ou de microrredes (*MicroGrids*), é de interesse o desenvolvimento de metodologias e ferramentas para a análise de impacto da GD e que auxiliem a etapa de tomada de decisão no planejamento da expansão considerando múltiplos objetivos por vezes em conflito; possibilitem a inclusão da natureza dinâmica do sistema de potência, modelando, por exemplo, a complexa relação entre geração e demanda ao longo do tempo; possam ser integradas às estratégias de planejamento das redes de distribuição; levem em conta as incertezas; e apresentem flexibilidade de modificação nos modelos matemáticos de otimização (ALARCON-RODRIGUEZ; AULT; MCDONALD, 2007; EUROPEAN COMMISSION, 2008; NEIMANE, 2001).

É apresentada então como proposta a avaliação do impacto da GD que contribua na etapa de planejamento da expansão da rede de distribuição, realizada utilizando-se ferramentas e metodologia baseadas em meta-heurísticas de otimização multiobjetivo.

1.1 Otimização multiobjetivo na análise da integração de Geração Distribuída às redes de distribuição

A formulação de modelos de programação e o planejamento multiobjetivos e sua solução através de técnicas de otimização multiobjetivo apresentam algumas vantagens sobre a otimização mono-objetivo (COHON, 2003). Uma delas refere-se à questão de que frequentemente os analistas responsáveis por obter informação de suporte à decisão não serão os decisores. Num contexto de otimização multiobjetivo (OM) os modelos adotados pelos analistas podem ser concebidos no sentido de oferecer um conjunto de soluções evitando que já nessa etapa estejam presentes implicitamente elementos de tomada de decisão. Portanto, os decisores podem ter disponível um conjunto maior de alternativas mantendo seu papel de decisão mais bem definido. Enfim, a modelagem do problema com os múltiplos objetivos

contribui para a aproximação da realidade, permitindo modelar objetivos em conflito separadamente e observar as condições de compromisso entre eles, caso existam.

Quanto à etapa de programação multiobjetivo, os métodos baseados em programação matemática clássica exigem que o problema seja modelado atendendo a definições matemáticas como linearidade de funções objetivo e restrições, ou garantia de continuidade e convexidade da região factível. Neste sentido, as meta-heurísticas são mais flexíveis e passíveis de alteração, o que atende às necessidades de possibilidade de alteração e natureza dinâmica do problema de planejamento. Sobre as meta-heurísticas, pode-se utilizar os métodos definidos como clássicos, cuja implementação resulta em adaptações a algoritmos de otimização mono-objetivos, ou os métodos baseados em conceitos de otimalidade de Pareto, especialmente os conhecidos como de segunda geração que apresentam mecanismo de elitismo e desempenho melhorado.

Portanto, é relevante investigar, segundo as necessidades apontadas para o problema em questão, o impacto causado pela crescente penetração da GD nas redes de distribuição de média tensão como um problema de OM, atendendo à demanda pela consideração de vários objetivos. A metodologia proposta visa não apenas à obtenção das soluções que apresentam o melhor compromisso entre os objetivos, mas também busca-se informações adicionais, a partir da avaliação do conjunto de soluções ótimas de Pareto, acerca da relação entre os impactos da GD, refletidos pelos objetivos, e as variáveis de decisão. Além disso, essa metodologia é ainda empregada no sentido de obter tanto as condições de penetração da GD mais benéficas quanto as mais prejudiciais para a rede de distribuição. Essa determinação da extensão do impacto que pode ser causado pela GD, tanto negativo quanto positivo, pode ser aproveitada, por exemplo, em estudos de regulamentação ou promovendo condições mais abrangentes à tomada de decisão no processo de planejamento da expansão da rede. De maneira a contemplar as características buscadas de flexibilidade na concepção e alteração nos modelos de otimização, serão avaliadas as potencialidades das meta-heurísticas para a análise de impacto da GD, com maior ênfase sobre aquelas baseadas em conceitos de otimalidade de Pareto. Nesse aspecto, desenvolveu-se no âmbito desta tese uma versão multiobjetivo do método *Evolutionary Particle Swarm Optimization*, chamada MEPSO, com o objetivo de explorar o desempenho superior deste método com relação a outros em problemas de otimização mono-objetivo. Finalmente, foi realizado um estudo de comparação entre os desempenhos dos métodos MEPSO, *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) e Busca Tabu multiobjetivo.

1.2 Revisão do estado da arte

Ao se analisar as publicações que abordam o tema do planejamento incluindo a GD e empregando técnicas de OM, convém observar os atributos a serem otimizados, a metodologia e modelagem usadas tanto para o problema de planejamento quanto da GD e a técnica de programação multiobjetivo.

Ochoa (2006), Ochoa, Padilha-Feltrin e Harrison (2008a) aplicam na OM o método da Soma Ponderada em que se faz a combinação linear de todas as funções objetivo em uma única. Para tanto, foram definidos como funções objetivo seis índices estritamente técnicos e normalizados procurando otimizar as perdas ativas e reativas, a máxima queda de tensão, a capacidade de reserva de corrente dos condutores e o nível das correntes de curto-circuito trifásicas e fase-terra. O método da Soma Ponderada apresenta simples implementação e modificação, tendo sido utilizado como uma abordagem *a-priori*, em que é definido apenas um conjunto inicial de pesos, o que apresenta a desvantagem da necessidade de definir precisamente os valores dos pesos. Posteriormente, Ochoa (2006) utilizou o método NSGA para determinar o conjunto ótimo de Pareto com um conjunto menor de objetivos: minimização de perdas ativas e do nível de curto-circuito fase-terra e tanto a minimização quanto a maximização da energia exportada a partir da rede de distribuição através da subestação (SE). Tal estratégia supera as limitações verificadas com a solução do problema através do método da Soma Ponderada. Uma contribuição de Ochoa (2006) e Ochoa, Padilha-Feltrin e Harrison (2008a) está na forma de abordagem do aspecto dinâmico das redes de distribuição: é considerada a variação da demanda ao longo do dia e o caráter intermitente que pode estar presente na GD, no caso, através da inclusão de geradores eólicos. É modelada ainda a diferenciação de áreas na rede de distribuição com diferentes comportamentos dos ventos. Em ambos os trabalhos procura-se, do ponto de vista da concessionária, a alocação ótima de um número definido de unidades geradoras.

Carpinelli et al. (2005) propõem três funções objetivo a serem minimizadas: perfil de tensão, custo das perdas e índice de qualidade de energia. Já Celli et al. (2005) minimizam um conjunto de quatro objetivos, todos baseados em custos de operação e planejamento da rede. Finalmente, Celli et al. (2006) repetem alguns dos objetivos de minimização de custo referidos anteriormente, sendo acrescentado o índice de aceitabilidade da GD na rede. Neste são combinados os custos de investimento em expansão e de perdas, permitindo-se determinar a penetração ótima de GD na rede de distribuição considerando a minimização do prejuízo causado pelas unidades já alocadas no sistema em posições que não trazem benefícios em

termos de custo. Carpinelli et al. (2005), Celli et al. (2005, 2006) desenvolveram uma metodologia global de avaliação da GD, não só gerando um conjunto de boas alternativas ao planejador, mas definindo também uma metodologia sistematizada de escolha das soluções geradas. Características das condições reais do problema são incorporadas nas funções objetivo, como a condição intermitente da geração eólica, definindo diferentes cenários e um conjunto de boas soluções para cada um deles. Entretanto, não é mencionado como é considerada a característica dinâmica da demanda e da rede de distribuição (previsão de aumento da demanda, por exemplo). Trata-se de uma formulação que busca a alocação ótima dos geradores e utiliza o método ε -Restrito (*ε -Constraint Method*) com Algoritmos Evolucionários (AEs). Essas metodologias apresentam sofisticação e abrangência quanto ao processo global de tomada de decisão. Contudo, o método ε -Restrito usado para a determinação das soluções não dominadas apresenta algumas limitações.

Na obra de Mendonça, Matos e Peças-Lopes (2004) o problema abordado diz respeito ao conceito de microrredes. Neste caso, trata-se da avaliação do nível de penetração da geração eólica em uma rede isolada. Desta forma, o enfoque principal dos objetivos definidos está sobre a questão das perdas e do impacto ambiental, considerado pela minimização da emissão de CO₂ e maximização do nível de geração eólica. A metodologia é semelhante às que já foram expostas, sendo utilizado o método ε -Restrito e AEs para a determinação do conjunto ótimo de Pareto. Foram feitas análises estáticas e dinâmicas da rede.

No trabalho de Kim (2002) o problema de alocação da GD é abordado utilizando um método que combina AEs e lógica difusa. Apesar de não apresentar uma metodologia geral para análise, essa referência tem a proposta de avaliar a natureza imprecisa do problema utilizando elementos de lógica nebulosa. Inicialmente apenas a minimização das perdas é considerada com os níveis de tensão e número ou porte das unidades de GD como restrições. Em seguida, são convertidos em um problema multiobjetivo e modelados através de lógica difusa para considerar sua natureza imprecisa. Por fim é aplicado o método baseado em AEs conhecido como Programação por Metas (*Goal Programming*).

Enquanto as abordagens descritas anteriormente apresentavam o processo de otimização do ponto de vista das concessionárias, Harrison et al. (2007) definem como objetivos a maximização dos rendimentos dos operadores da rede e dos proprietários da geração. As unidades geradoras tiveram suas localizações predefinidas, sendo otimizada a capacidade de cada uma. Somente a natureza dinâmica das cargas foi modelada, com a geração operando continuamente em sua capacidade nominal. Quanto às técnicas de otimização, foi usado um fluxo de potência ótimo aliado ao método ε -Restrito para a obtenção

do conjunto ótimo de Pareto. Em seguida é aplicada às soluções obtidas uma metodologia de apoio à decisão em que é definido um subconjunto de soluções ótimas que estejam mais próximas do ponto ideal no espaço das funções objetivo. Esse conjunto é conhecido como *knee set* por corresponder ao “joelho” da fronteira de Pareto. Observar a relação entre os interesses da concessionária e dos produtores de energia e a proposta de uma metodologia clara de apoio à decisão destacam-se como contribuições. Contudo, a técnica de apoio à decisão é caracterizada pela dependência da métrica a ser adotada para determinar a distância entre os pontos da fronteira de Pareto e o ponto ideal (MIRANDA; PROENÇA, 1998).

Uma revisão do estado da arte do planejamento de recursos de energia distribuídos usando OM é apresentado por Alarcon-Rodriguez, Ault e Galloway (2010). Pode-se neste trabalho observar a evolução das técnicas e modelos aplicados ao problema. Quanto aos métodos de otimização há predominância das meta-heurísticas evolucionárias com progressivo abandono das abordagens clássicas de OM em benefício das baseadas em conceitos de otimalidade de Pareto, com destaque para os métodos de segunda geração NSGA-II e *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2). Quanto à modelagem do problema, nota-se certa tendência em torná-la mais realista incluindo aspectos dinâmicos da geração e da demanda e ferramentas probabilísticas de análise.

O problema de planejamento na presença tanto de recursos de energia distribuídos (RED) estocásticos (geração eólica e fotovoltaica) quanto controláveis (cogeração) é abordado no trabalho de Alarcon-Rodriguez et al. (2009). No modelo de OM do problema são minimizadas funções objetivo que refletem o nível de perdas, os RED despachados anualmente para a provisão local de serviços ancilares, o corte de geração anual dos RED, um fator de emissões de CO₂, um índice de qualidade do nível de tensão da rede e o nível de penetração dos RED. O processo de otimização ocorre em dois níveis: faz-se inicialmente um planejamento multiobjetivo, utilizando o método SPEA2, em que são considerados como variáveis de decisão o tipo, o nível de geração e o nó de conexão dos geradores. Em caso de violação das restrições técnicas da rede, realiza-se o gerenciamento ativo dos RED que consiste num segundo processo de otimização, utilizando um fluxo de potência ótimo, que atua sobre o despacho da cogeração e no corte da geração eólica e fotovoltaica. As variações nas fontes intermitentes e na demanda são consideradas através de perfis anuais de carga e geração compostos a partir de dados históricos. Utilizou-se o método gráfico para a avaliação de compromissos entre os objetivos, sendo uma das contribuições apresentadas a aplicação da análise de componentes principais, ferramenta estatística utilizada para apresentar as correlações entre os objetivos. É enfim apresentado um estudo de caso demonstrando as

relações de conflito entre os objetivos e analisando as possibilidades de integração dos RED com gerenciamento ativo. O processo de OM proposto não corresponde ao processo tradicional de escolha das soluções de melhor compromisso e de uma opção final a ser implementada.

Apesar da crescente investigação e desenvolvimento da aplicação de OM ao planejamento na presença de GD, passando a modelagens do problema mais consistentes e avançando nas técnicas de obtenção do conjunto ótimo de Pareto, há ainda necessidade na investigação de alguns aspectos do processo, como nas metodologias de apoio à decisão e em estudos que auxiliem na escolha das técnicas de OM, por exemplo. Percebe-se ainda que o uso da OM nem sempre corresponde à sua estrutura tradicional, na qual há a busca da solução de melhor compromisso dentro do conjunto de soluções ótimas.

1.3 Estrutura da tese

O presente documento está organizado como segue.

No Capítulo 2 procura-se contrapor as características tradicionais das redes de distribuição e as mudanças que emergem com a penetração da GD. São ainda apresentados aspectos, paradigmas e definições relacionados à GD, os quais devem ser considerados na avaliação dos impactos causados pela geração.

No Capítulo 3 é apresentada uma síntese dos principais conceitos de OM e uma classificação das metodologias. Em seguida, os algoritmos de dois dos métodos utilizados na comparação de desempenho entre meta-heurísticas de OM, os métodos NSGA-II e Busca Tabu multiobjetivo, são apresentados em detalhes.

No Capítulo 4 apresenta-se uma proposta de meta-heurística de OM desenvolvida a partir das investigações desta tese, intitulada MEPSO, baseada no método de enxame de partículas combinado com Algoritmos Genéticos de segunda geração.

No Capítulo 5 é apresentada uma metodologia geral de avaliação de impacto causado pela Geração Distribuída. São definidos então dois modelos de análise em detalhes e as métricas utilizadas no estudo de desempenho dos métodos de otimização multiobjetivo. São expostos ainda detalhes de implementação e ferramentas computacionais utilizadas.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados do estudo de desempenho das meta-heurísticas de otimização multiobjetivo, da aplicação do modelo de alocação e dimensionamento ótimos e da aplicação do modelo de avaliação de impacto da GD sobre a capacidade da rede.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 7 e os desenvolvimentos futuros no Capítulo 8.

2 Geração Distribuída e impacto da integração da geração nas redes de distribuição

O processo tradicional de planejamento da expansão das redes de distribuição de energia elétrica apresenta elevada complexidade que é intensificada na presença da Geração Distribuída (GD). Convém, portanto, identificar características das redes de distribuição tradicionalmente concebidas e como são afetadas pela presença da GD e seus desdobramentos, como os conceitos de redes inteligentes (*Smart grids*) ou de microrredes (*Microgrids*), discutindo-se algumas questões de paradigma que emergem com a tendência cada vez maior de penetração da GD nas redes de distribuição de média tensão. Antes, porém, é necessário apresentar conceitos, definições e aspectos gerais acerca da GD.

2.1 Geração Distribuída

O termo Geração Distribuída não conta com uma definição universal, sendo seu entendimento muitas vezes dirigido segundo a óptica das entidades ou estudos que a definem, a tecnologia utilizada, a potência nominal dos geradores, a relação de proximidade com os centros consumidores, a localização na rede elétrica e o nível de tensão em que é conectada, entre outros elementos. Em termos gerais, entretanto, pode-se estabelecer que a expressão GD estabelece uma distinção em uma ou mais características com relação ao modelo tradicional de geração centralizada, como a distância entre a geração e o centro de consumo, a potência dos geradores ou o grau de dispersão das unidades de geração numa instalação geradora.

Ackermann, Andersson e Soder (2001) fazem uma revisão dos elementos considerados nas diferentes definições do conceito de geração distribuída, chegando-se a uma definição generalizada da GD como uma fonte de energia elétrica diretamente conectada à rede de distribuição ou através das instalações dos consumidores. São sugeridas ainda a distinção da GD em categorias segundo a tecnologia (modular, renovável e cogeração) e a potência nominal dos geradores (micro, entre 1 W até 5 kW; pequena, entre 5 kW e 5 MW; média, entre 5 MW e 50 MW; e grande de 50 MW a 300 MW). A definição de GD encontrada em Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2011b) é similar à de Ackermann, Andersson e Soder (2001) sendo acrescentado explicitamente que se trata de centrais geradoras de qualquer potência, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Outro exemplo de

definição de GD é encontrado em European Commission (2008) enfatizando o fato de ser geração descentralizada caracterizada pela localização junto aos centros de consumo. Quanto à nomenclatura, encontra-se de forma geral os termos geração embutida e geração dispersa tomados como sinônimos de geração distribuída, embora haja referências que estabeleçam diferença entre essas expressões. Para a ANEEL (2011b), por exemplo, geração embutida é considerada o mesmo que GD. Por outro lado, Ackermann, Andersson e Soder (2001) sugerem o termo “geração distribuída embutida” quando a GD é utilizada apenas na rede de distribuição local. Para a European Commission (2008), o termo geração dispersa é ainda distinguido de GD como sendo a geração descentralizada, possivelmente composta pela combinação de pequenas unidades geradoras, não necessariamente próxima aos centros de consumo, como os grande parques eólicos *offshore*.

Enfim, no âmbito desta tese tanto a definição de GD de Ackermann, Andersson e Soder (2001) quanto a da ANEEL (2011b) mostram-se adequadas. Quanto à terminologia, optou-se apenas pelo uso da expressão “geração distribuída”, evitando-se as expressões de conceito similar mencionadas.

2.1.1 *Tecnologias de Geração Distribuída*

Nesta seção serão apresentadas as principais tecnologias empregadas na GD, destacando-se questões como disponibilidade, potência gerada, tipo de conexão com a rede elétrica, impacto ambiental, entre outras. As tecnologias serão divididas em duas categorias: as renováveis e as não renováveis, que utilizam combustíveis fósseis.

2.1.1.1 *Tecnologias não renováveis (LORA; HADDAD, 2006)*

Uma das tecnologias utilizadas em GD mais desenvolvidas e largamente utilizadas são os motores alternativos de combustão interna (MACI). Apresentam disseminado uso e disponibilidade comercial, variando entre potências de 5 kW a mais de 30 MW. Estão entre os combustíveis utilizados o gás natural, o óleo *diesel* e o biogás. São vantagens do MACI seu baixo custo de investimento, flexibilidade de combustíveis e alta confiabilidade. Contudo, apresentam maiores emissões atmosféricas e ruído.

As microturbinas a gás podem produzir potência elétrica entre 25 kW e 500 kW, utilizando como combustíveis gás natural, GLP, biogás entre outros. Apresentam baixa emissão de poluentes e reduzido nível ruído. No entanto, representam ainda uma tecnologia com limitada disponibilidade comercial e alto custo.

As células a combustível funcionam como as baterias no sentido de que a energia elétrica é obtida a partir de uma reação química. No entanto, podem oferecer energia elétrica continuamente, desde que sejam fornecidos os reagentes (os gases hidrogênio e oxigênio). O gás hidrogênio pode ser obtido a partir do gás natural ou do biogás, por exemplo. As capacidades disponíveis dependem do tipo e vão desde alguns kW a dezenas de MW. É ainda uma tecnologia de alto custo e reduzida disponibilidade comercial. Apresentam como vantagem o baixo nível de ruídos e de emissões e alta eficiência.

Convém ressaltar que a classificação dessas tecnologias como não renováveis apresenta imprecisões, visto que algumas delas podem funcionar a partir de combustíveis como o biogás.

2.1.1.2 Tecnologias renováveis

As fontes de energia renováveis são de especial importância para a GD, pois apresentam como uma de suas principais características o reduzido impacto ambiental, principalmente com relação à emissão de gases de efeito estufa, sendo este um dos benefícios desejados com o uso da GD.

A energia eólica constitui uma fonte renovável cada vez mais aproveitada chegando a níveis de penetração em torno de 20% na matriz energética de alguns países como Dinamarca e Portugal (WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION - WWEA, 2011). É uma fonte de energia que tem se caracterizado pelo agrupamento dos geradores em parques eólicos tanto em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*).

Outra fonte renovável que vem recebendo crescente incentivo é a solar térmica e fotovoltaica, desde programas de incentivo ao uso residencial para aquecimento até centrais de geração de energia elétrica. No entanto, é uma tecnologia que ainda apresenta custo elevado.

A biomassa pode passar por vários processos que resultam em um produto energético para o uso final, sendo a obtenção de calor a partir da queima de resíduos de atividades agrícolas, nomeadamente os da produção de cana-de-açúcar, o meio de utilização mais disseminado no Brasil para a geração termelétrica, com destaque para o Estado de São Paulo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005). Enfim, a geração hidrelétrica de pequeno porte por meio das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) consiste em unidades produtoras operadas em regime de fio d'água com potência instalada da ordem

de até dezenas de MW que utilizam geradores síncronos e até mesmo assíncronos. Têm sido um recurso amplamente estimulado e explorado no Brasil.

Há algumas limitações referentes ao aproveitamento das tecnologias renováveis de GD, que se tornam cada vez mais relevantes à medida que cresce a penetração desse tipo de geração nas redes elétricas. Talvez o principal desafio técnico relacionado às fontes renováveis seja a intermitência na geração, que pode ser sazonal, como para as PCHs e termelétricas à biomassa, ou mesmo apresentar variação quase instantânea como ocorre com as eólicas e solar fotovoltaica. Uma forma de mitigar ou contornar esse efeito indesejável é o uso de dispositivos ou estratégias de armazenamento de energia, como baterias, *flywheels* ou bombeamento de água, que ainda representam, todavia, recursos de elevado custo.

Um elemento importante também de ser considerado ao avaliar o impacto da GD nas redes de distribuição é a interface de conexão utilizada. Na Tabela 1, adaptada de Puttgen, Macgregor e Lambert (2003), é apresentada uma síntese de algumas das tecnologias de GD quanto à capacidade delas e à interface de conexão à rede elétrica.

Uma característica presente em quase todas as tecnologias de GD apresentadas é a modularidade, o que representa vantagem em termos de padronização e principalmente na questão do investimento que pode ser feito de forma mais adequada, diminuindo os riscos.

Tabela 1 – Algumas tecnologias de geração distribuída, com informações de capacidade e interface de conexão.

Tecnologia	Faixa típica de capacidade	Interface de conexão
Fotovoltaica	De poucos W a várias centenas de kW	Conversores DC-AC
Eólica	De poucas centenas de kW a poucos MW	Geradores assíncronos e conversores AC-AC
MACI	De poucas centenas de kW a dezenas MW	Geradores assíncronos ou conversores AC-AC
Turbinas de combustão	De poucos MW a centenas de MW	Geradores síncronos
Microturbinas	De dezenas de kW a poucos MW	Conversores AC-AC
Células a combustível	De dezenas de kW a poucas dezenas de MW	Conversores DC-AC
PCHs	De dezenas de kW a dezenas de MW	Geradores síncronos e assíncronos
Biomassa (cana-de-açúcar)	De centenas de kW a dezenas de MW	Geradores síncronos

Fonte: Adaptada de Puttgen, Macgregor e Lambert (2003).

2.1.2 *Conceitos e tendências relacionadas à Geração Distribuída*

Há alguns conceitos e paradigmas interrelacionados com a GD cujo entendimento é de fundamental importância, pois dirigem ou mesmo definem a forma como ocorre o desenvolvimento da GD e o seu aproveitamento.

O conceito de redes inteligentes, embora não apresente uma definição consensual, pode ser identificado como a busca por incorporar tecnologias, nomeadamente de automação e comunicação, à rede elétrica permitindo que esta seja operada de forma mais eficiente e segura. As metas que orientam o desenvolvimento das redes inteligentes nas diferentes localidades fazem com que o conceito seja visto de formas diversas. Há lugares, por exemplo, onde o principal apelo às redes inteligentes está no aumento de confiabilidade da rede; noutros busca-se a redução das perdas comerciais ou ainda a facilitação da integração da GD.

No que concerne à GD, a concepção das redes inteligentes não está restrita a esse fenômeno ou a outros recentes como os veículos elétricos ou tecnologias como os medidores inteligentes, mas concentra-se mais em como integrar essas e outras tecnologias de forma plena e eficiente (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2009). Um outro elemento essencial no desenvolvimento das redes inteligentes é a mudança da relação entre os consumidores e a rede elétrica. Sustentados principalmente por sistemas avançados de comunicação e pelos medidores inteligentes, os consumidores podem, por exemplo, ter seus hábitos de consumo de energia elétrica dirigidos pelos preços, obtidos em tempo real, e as concessionárias podem também se beneficiar com um controle maior da rede elétrica, tanto em condições de operação normais quanto sob contingências (MORGAN et al., 2009). Há uma série de projetos-piloto em andamento em várias partes do mundo, especialmente acerca dos medidores inteligentes, no sentido de amadurecer as tecnologias necessárias para a implantação de conceitos das redes inteligentes, inclusive no Brasil (SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011). No entanto, alguns pontos sobre esse paradigma ainda carecem de investigação, em especial as vulnerabilidades que podem surgir com uso mais disseminado de estruturas de comunicação, inclusive relacionadas à *Internet*, na rede elétrica (MORGAN et al., 2009).

Um fenômeno relacionado à GD são as microrredes, em que são integradas à média e baixa tensões de distribuição alguma tecnologia de GD, cargas e dispositivos de armazenamento de energia associados a um controle local de operação (COSTA; MATOS; PEÇAS-LOPES, 2008; HATZIARGYRIOU et al., 2007). Do ponto de vista da rede elétrica, a microrrede opera como um sistema controlável de geração local de energia elétrica e calor, podendo operar tanto conectada à rede como de forma ilhada.

2.2 Características tradicionais das redes de distribuição e Geração Distribuída

Historicamente, os sistemas elétricos foram concebidos com uma estrutura de geração distribuída, com a geração local atendendo à demanda local. Esse paradigma foi radicalmente redefinido com a adoção de um modelo centralizado em que grandes centrais geradoras são responsáveis por abastecer as cargas através de um sistema de transmissão de energia elétrica que alimenta finalmente a rede de distribuição de energia elétrica, pela qual a grande maioria dos consumidores finais é atendida (JENKINS et al., 2000). Por conta dessa concepção e de outros fatores, as redes de distribuição apresentam características gerais próprias como a estrutura radial, os níveis de tensão, e a natureza passiva em que todas as cargas são

conectadas a uma única fonte de alimentação, a subestação (SE). Mesmo assim, o planejamento no nível da distribuição é, como em todo o sistema de potência, uma tarefa de alta complexidade apresentando elementos como conflito de objetivos, um grande número de variáveis, natureza dinâmica do problema, incertezas e elevados investimentos.

O processo de planejamento consiste na identificação das necessidades da rede elétrica para um horizonte de estudo, traduzi-las em objetivos a serem otimizados, e a partir de então identificar, avaliar e escolher um conjunto de alternativas. No caso do planejamento da expansão essas alternativas podem ser a construção ou adequação de subestações, construção de circuitos, a substituição de condutores e a instalação de equipamentos. Finalmente é então definida, dentre as melhores possibilidades, a estratégia a ser aplicada. Este procedimento apresenta uma série de elementos dinâmicos relacionados em especial às cargas que variam ao longo do dia e ao longo do horizonte de planejamento considerado. Há ainda, com relação às cargas, incertezas sobre seu comportamento no tempo e no espaço. Somado a isso existe a influência de ordem legal, econômica, social e ambiental.

2.2.1 Os impactos da Geração Distribuída

Dentre os novos desafios ao planejamento da expansão das redes de distribuição, a GD ocupa posição de destaque dada a profunda mudança de paradigma que promove, tanto isoladamente quanto dentro de conceitos mais abrangentes, como o das redes inteligentes e das microrredes. A presença da GD faz com que a rede de distribuição perca sua tradicional característica passiva, sendo necessário que as estratégias de planejamento sejam remodeladas em termos de concepção e técnicas. Sabe-se que a introdução de unidades geradoras nas redes de distribuição pode ter tanto efeito benéfico como prejudicial, o que depende do relacionamento de vários fatores interdependentes como a posição da unidade geradora, fonte primária e tecnologia de geração, capacidade de geração e características da rede elétrica. Portanto, aliadas às incertezas e dinâmica das cargas há também condições semelhantes relacionadas à geração: atualmente não é comum ou mesmo não se permite que as concessionárias de distribuição sejam proprietárias de unidades geradoras, o que traz incerteza com relação a aspectos decisivos para identificar o impacto da GD sobre a rede, como a localização, o nível de geração e tecnologia das unidades geradoras. É importante então reconhecer oportunidades, estímulos e desafios referentes à crescente integração da GD às redes de distribuição de modo a orientar o planejamento nesse contexto.

2.2.1.1 Integração da Geração Distribuída: fatores que orientam o aproveitamento e o desenvolvimento (PEÇAS-LOPES et al., 2007)

Um dos principais estímulos à integração da GD, principalmente na Europa, é a busca de redução da emissão de gases de efeito estufa, utilizando fontes renováveis de energia e o conceito de cogeração. Outro ponto observado ainda é a tentativa de evitar os impactos ambientais causados pelo modelo de geração centralizada com grandes centrais elétricas e linhas de transmissão. Um exemplo da relevância da questão ambiental pode ser observado através do impacto causado pelo acidente nuclear de Fukushima, ocorrido em março de 2011, sobre a política energética de países com considerável presença de centrais nucleares. A Alemanha, por conta do acidente, definiu como meta encerrar a atividade de suas usinas nucleares até 2022 (THE GUARDIAN, 2011), ocorrendo em agosto de 2011 o encerramento definitivo do funcionamento de 6 usinas (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2011). Isso torna ainda mais urgente a necessidade de se desenvolverem alternativas de geração elétrica, incluindo o maior aproveitamento da GD.

As incertezas em mercados de energia altamente competitivos favorecem investimentos de menor porte e risco, como a GD. Além disso, a GD pode ser investigada como uma opção de custo apreciável para melhorar a qualidade e confiabilidade da rede.

Investindo no avanço da GD, um país pode diversificar sua matriz energética, reduzindo a dependência com relação a alguma fonte de energia. Isso aumenta a segurança no fornecimento de energia, assim como a própria estrutura dispersa de geração, que diminui o impacto de interrupções sobre os consumidores. Além disso, um cenário com elevada penetração de GD pode tornar o mercado de energia mais competitivo, conferindo poder de escolha aos usuários, o que permite a redução de preços e melhoria na qualidade do serviço.

Do ponto de vista técnico, o progresso de tecnologias de geração, de interface com a rede elétrica e relacionadas às redes inteligentes certamente atuam como estímulo ao aproveitamento da GD.

2.2.1.2 Integração da Geração Distribuída: desafios a serem superados (DRIESEN; BELMANS, 2006; PEÇAS-LOPES et al., 2007)

Uma das principais questões na integração da GD às redes de distribuição é a manutenção dos níveis de tensão, ocorrendo problemas de regulação, como a elevação de tensão em redes rurais. A GD pode ainda ter impacto tanto positivo quanto negativo sobre os níveis de perdas da rede ou sobre a qualidade da energia fornecida. A proteção é outro aspecto da rede profundamente afetado pela GD, sendo necessário: avaliar a proteção interna dos equipamentos de geração; o reflexo sobre os níveis de corrente de falta; as manobras de anti-ilhamento (sendo, contudo, a operação ilhada uma tendência para o futuro); e o impacto sobre os esquemas de proteção existentes na rede. Há agora também a necessidade de analisar questões, como estabilidade transitória e dinâmica do sistema ou de colapso de tensão, surgidas com a inserção dos geradores.

Com relação aos aspectos comercial e de regulamentação, é necessário ainda identificar o custo associado com a operação de redes de distribuição com a presença de GD. Questões como tarifação e compensações comerciais aos agentes de mercado ainda estão em definição em diversos países. Em geral, o nível de penetração da GD não é maior atualmente também pela carência de normas regulamentadoras e de políticas de incentivo, embora existam diversos mecanismos de incentivo à GD, especialmente para as tecnologias renováveis (BURGERS; OMMEN; VERHEIJ, 2009).

2.2.1.3 Integração da Geração Distribuída: impactos sobre a rede de distribuição

Posição e capacidade da geração distribuída

O impacto da GD é fortemente influenciado pelo ponto de conexão do gerador, sua capacidade (ou nível de geração) e regime de operação, sendo estes fatores que definem se o gerador trará benefícios ou prejuízos para a operação da rede. O impacto negativo que a GD pode causar sobre a tensão, por exemplo, que pode se elevar excessivamente dependendo da quantidade de geração, em especial nos períodos de demanda mínima (MASTERS, 2002). Além disso, a GD pode prover importante contribuição quando é capaz de gerar nos horários de pico da demanda (DRIESEN; BELMANS, 2006; DUGAN, 2007).

Regulação de tensão

A questão de regulação de tensão figura como uma das questões mais fundamentais numa análise de impacto da GD sobre a rede de distribuição. O problema consiste em manter

os níveis de tensão em todas as barras da rede elétrica dentro dos limites admissíveis, em regime permanente.

Nas redes de distribuição passivas, com o fluxo de potência ocorrendo unidirecionalmente da subestação para as cargas, a regulação de tensão é assegurada através de uma série de práticas como a mudança do nível de tensão na SE, a instalação de capacitores fixos ou chaveados e de reguladores automáticos de tensão ou mesmo o investimento na estrutura da rede. Porém, a crescente penetração da GD tem impacto determinante nas estratégias de regulação de tensão. Cabe ressaltar que as redes de distribuição apresentam uma característica diferente dos sistemas de transmissão quanto ao controle de tensão e suporte de reativos: na distribuição, por conta do elevado valor da relação R/X verificado com relação à transmissão, ocorre que a magnitude da tensão nas barras não é apenas significativamente afetada pela potência reativa, mas também pela potência ativa (MASTERS, 2002). Assim, dada essa transição de modelos de operação das redes de distribuição, a GD ainda não tem todas as suas potencialidades plenamente aproveitadas, visto que se procura impedir qualquer prejuízo que os geradores possam oferecer às estratégias de regulação de tensão tradicionais já implantadas. Nesse sentido, a norma 1547 do IEEE, que define padrões de conexão da GD no sistema elétrico, especifica que a GD não deve regular ativamente as tensões da rede de distribuição (KOJOVIC, 2006; WALLING et al., 2008). Exceção é feita quando existe um acordo mútuo entre a concessionária e o proprietário da GD, permitindo a regulação de tensão.

A operação da GD no modo fator de potência constante faz com que o seu efeito na rede de distribuição seja como de uma carga negativa no ponto de conexão do gerador. Essa abordagem pode limitar possíveis benefícios econômicos, técnicos e ambientais dos geradores já instalados, como também representar uma barreira para a maior integração da GD. Sabe-se ainda que a falta de coordenação entre a geração e as estratégias de controle de tensão existentes pode causar o funcionamento inadequado de reguladores de tensão (RTs), capacitores chaveados e transformadores com comutação sob carga na SE. Aspectos relativos à operação dos geradores no modo de fator de potência constante estão amplamente reportados na literatura, por exemplo, Barker e Demello (2000), Masters (2002), Baghzouz (2006) e Carvalho, Correia e Ferreira (2008), por ser este o modo inicialmente empregado e ainda em uso na maioria das redes de distribuição.

Há uma outra forma de operar a GD, chamado modo tensão constante, em que os geradores podem ativamente controlar a tensão na barra de conexão. Quando opera desta forma, a GD pode ser limitada na regulação da tensão. Além disso, o gerador pode apresentar

degradação no seu fator de potência, o que não é desejável já que compromete a produção de potência ativa. Assim, quando um determinado limite de fator de potência for atingido o gerador passa a operar no modo fator de potência constante (WALLING et al., 2008). Pouco utilizado ainda na prática, esse modo de operação é visto como um dos possíveis serviços ancilares que os geradores podem oferecer às redes de distribuição, sendo considerado um passo importante a ser tomado para o desenvolvimento da GD (CELLI, 2005; THONG; DRIESEN; BELMANS, 2007; WALLING et al., 2008).

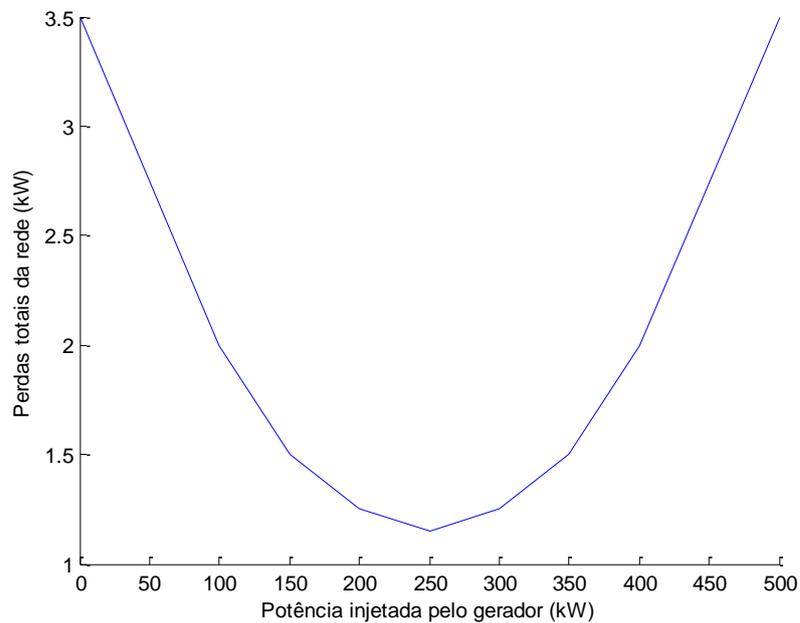
Capacidade da rede de distribuição

Em geral, são usados como indicadores da capacidade da rede os limites de corrente nos cabos e o limite de potência do transformador da SE. Ganhos na capacidade da rede e a possibilidade de adiar investimentos são indicados como incentivos decisivos para a integração da GD (MENDEZ et al., 2006; SIANO et al., 2009; WILLIS; SCOTT, 2000).

Nível de perdas

O nível de perdas é amplamente utilizado como objetivo a ser minimizado em estudos de impacto da GD, pois é um indicador de eficiência e indiretamente indica o efeito da geração sobre a capacidade e a tensão. Em alguns lugares, inclusive, existem mecanismos de regulação relacionados às perdas, que determinam penalizações e recompensas segundo o desempenho do operador da rede elétrica neste aspecto (HARRISON et al., 2007). Tipicamente a relação das perdas com a injeção das unidades de GD é descrita por uma curva em “U”, como mostrado na Figura 1 (JENKINS et al., 2000), em que as perdas inicialmente diminuem com o aumento da geração. Há, entretanto, um ponto de inflexão a partir do qual o crescimento da geração implica elevação das perdas.

Figura 1 – Variação das perdas totais da rede com a potência injetada pelo gerador distribuído.



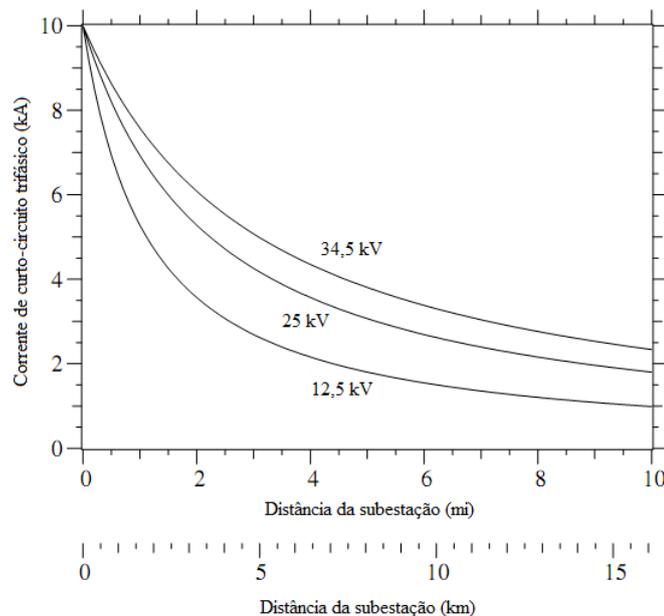
Fonte: Adaptada de Jenkins et al. (2000).

Níveis das correntes de curto-circuito

A integração da GD, geralmente, tem impacto negativo sobre a operação da proteção. Isso se deve principalmente à contribuição da GD às correntes de curto-circuito e aos fluxos de potência reversos, que resultam em mudança dos equipamentos e estratégias de proteção. Para definir o impacto da GD sobre o sistema de proteção é importante determinar a quantidade em que foi elevada a corrente de curto-circuito e a percentagem da mudança na corrente de curto-circuito com relação ao valor original (PRICE et al., 2005). O primeiro aspecto é importante para avaliar a adequação de fusíveis e disjuntores. A escolha desses dispositivos de proteção muitas vezes considera o perfil das correntes de curto-circuito típico de um alimentador radial em que as correntes de curto-circuito diminuem à medida que a distância à SE aumenta, como mostrado na Figura 2 (SHORT, 2003). Assim, esses dispositivos podem ser inadequados, dependendo do nó da rede em que a GD é conectada, precisando de redimensionamento. Já a questão da variação relativa da corrente de curto-circuito deve ser analisada com relação à coordenação entre relés e fusíveis e aos ajustes dos relés (PRICE et al., 2005).

No entanto, as tecnologias de GD conectadas à rede através de interfaces de eletrônica de potência, como conversores, podem não apresentar impacto significativo sobre as correntes de curto-circuito devido à atuação desses dispositivos de interface (SILVA; STRBAC, 2008).

Figura 2 – Perfil das correntes de curto-circuito para uma rede aérea de distribuição.



Fonte: Adaptada de Short (2003).

2.2.2 Propriedade da Geração Distribuída por parte das concessionárias

No contexto europeu (EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION, 2006), ocorre incipiente ou mesmo ausente prática de planejamento da rede elétrica levando em consideração a GD. Aliada a certa relutância tradicional, é apontada ainda a regulamentação que visa a estabelecer mercados de energia como uma das principais causas para isso (EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION, 2007). É de fundamental importância para o estabelecimento da estrutura de mercado que haja a separação dos agentes responsáveis pelas atividades de geração, transmissão e distribuição. No entanto, tal exigência coíbe a propriedade da geração por parte das concessionárias. Consequentemente, a rede pode ser operada de forma ineficiente sem contribuir para o aproveitamento dos possíveis benefícios da GD, sendo quase que exclusivamente o investimento em infraestrutura de rede a alternativa de expansão ou adequação.

Já a regulamentação nos EUA permite que as companhias de distribuição instalem convenientemente geradores na rede como forma de adiar investimentos (SIANO et al.,

2009). Como exemplo, *The New York Public Service Commission* incorporou tecnologias de GD no processo de planejamento das empresas de distribuição. Os operadores da rede podem ainda oferecer incentivos à conexão da GD pertencente a terceiros em localizações convenientes.

Em ambos os modelos apresentados, o europeu e o estadunidense, está uma questão de fundamental relevância a ser incluída no modelo de planejamento: a possibilidade de propriedade da GD pelas concessionárias de distribuição. Pode-se observar a influência desse aspecto sobre o planejamento considerando duas possibilidades: (a) os operadores da rede podem ser proprietários de unidades geradoras e utilizar esse recurso nas estratégias de planejamento; (b) às concessionárias não é permitido investir em melhorias da rede contando com geração de sua propriedade. O problema (a) corresponde a analisar a alocação ótima de geradores ao qual pode ser acrescentado o efeito da geração conectada à rede por terceiros e que, portanto, não estão sob controle do operador da rede. Na situação (b) a concessionária enfrenta uma condição de incerteza procurando identificar os impactos do livre acesso dos geradores à rede. Em ambos os casos é conveniente conhecer os limites de impacto da geração sobre a rede: tanto os máximos benefícios que podem ser obtidos em cada critério como os cenários mais negativos. Essa informação pode ainda ser relacionada a uma análise dos nós da rede em que se pode obter maior benefício com a GD ou aqueles mais vulneráveis nos quais a presença de geradores poderia representar a necessidade de investimentos na rede.

Apesar dessas motivações e desafios expostos não compreenderem todas as dimensões e matizes do problema nos diferentes locais do mundo, elas certamente resumem características universais observadas em realidades de grande aproveitamento da GD. Assim, o panorama descrito aponta aspectos a serem considerados nos modelos para o planejamento da distribuição na presença da GD. Isso deve orientar as formulações e metodologias que serão apresentadas em detalhes no Capítulo 5, embora nem todos os fatores identificados sejam incorporados aos modelos.

3 Otimização Multiobjetivo

As raízes da teoria de Otimização Multiobjetivo (OM) remontam aos estudos no campo da economia do final do século XIX e início do século XX, período em que estão situados, por exemplo, os trabalhos de Vilfredo Pareto na área (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Contudo, são nas décadas de 50 e 60 do século XX que a OM avança em termos de desenvolvimento matemático e aplicação, em especial na economia, pesquisa operacional e psicologia (COHON, 2003). É, portanto, a partir deste último período que deve ser feita uma análise das metodologias, principalmente de programação multiobjetivo, com relação ao seu desenvolvimento histórico e segundo suas características. Além disso, será apresentado neste capítulo um conjunto de conceitos e definições próprios da OM e fundamentais para sua compreensão. Finalmente serão apresentados com mais detalhes os algoritmos de duas meta-heurísticas de OM, os métodos *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) e Busca Tabu multiobjetivo (BTMO), utilizadas nesta tese em estudos de comparação de desempenho.

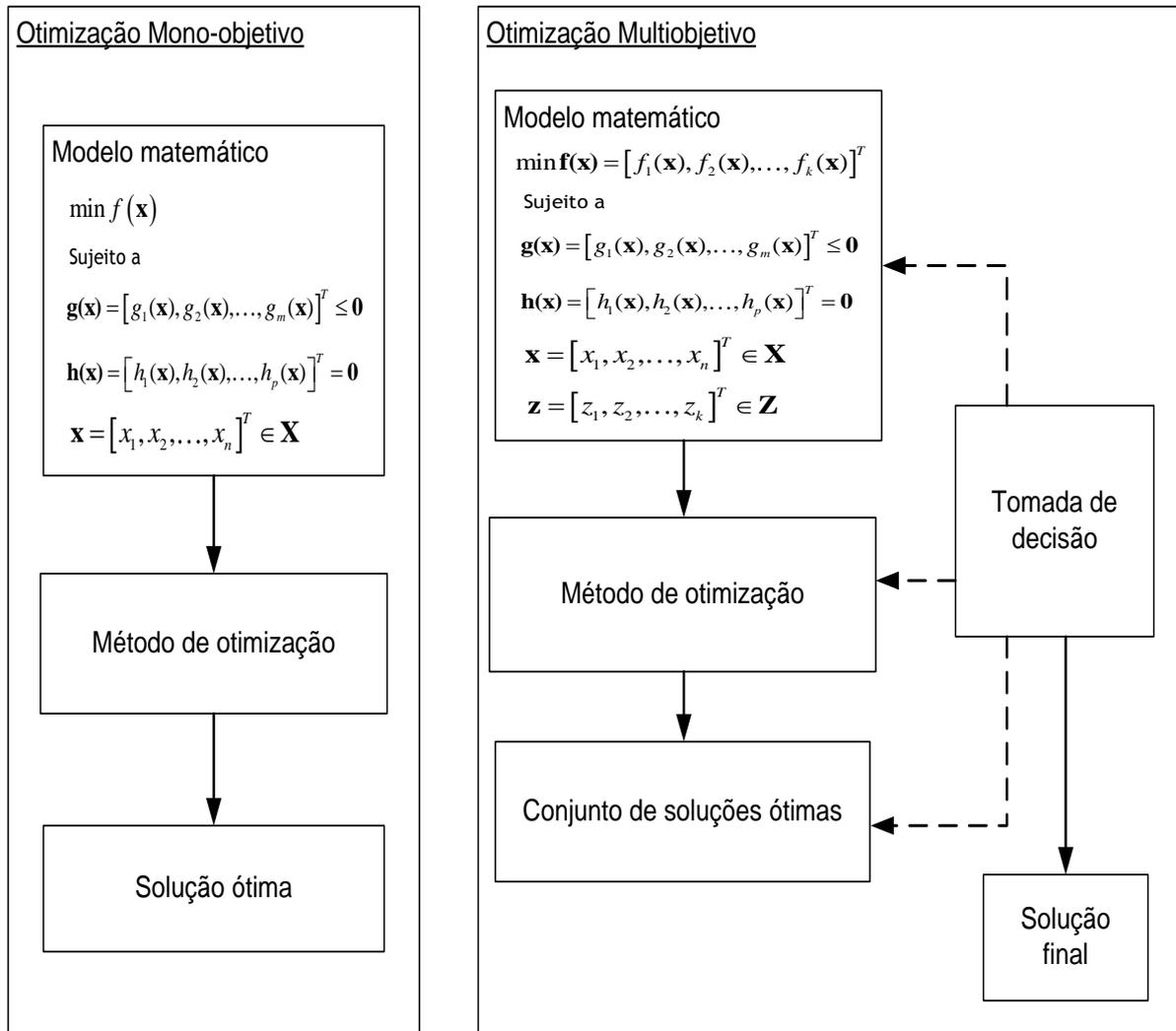
3.1 Conceitos e Definições

Tradicionalmente, o processo de otimização matemática está baseado na minimização ou maximização de uma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições que define a factibilidade. Em oposição à OM esse modelo será designado por otimização mono-objetivo. A função objetivo e as restrições são funções matemáticas das variáveis de decisão, que são grandezas controláveis, e de parâmetros que são dados do problema. Essa estrutura vem sendo aplicada com sucesso a vários problemas de diversas áreas, em particular em sistemas elétricos de potência, de forma consolidada, como no problema de fluxo de potência ótimo. Contudo, a formulação de problemas usando otimização mono-objetivo por vezes não trata de forma explícita ou mesmo ignora a existência de múltiplos objetivos que apresentam algum nível de conflito, o que se verifica frequentemente na realidade.

Nesse contexto, a OM consiste em minimizar ou maximizar simultaneamente um conjunto de objetivos sujeito a uma série de restrições. Assim, ainda que sejam empregadas técnicas que permitam resolver um problema multiobjetivo utilizando uma ferramenta de otimização mono-objetivo, o conceito de otimização em um cenário multiobjetivo consiste em escolher, num conjunto de soluções em que os valores dos objetivos não podem ser

melhorados simultaneamente (conjunto de soluções ótimas de Pareto ou de soluções não dominadas), a melhor solução segundo critérios de tomada de decisão de um agente humano. Esse processo, comparado ao da otimização mono-objetivo, está representado na Figura 3.

Figura 3 – Estrutura básica da otimização mono e multiobjetivo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se pelo diagrama da Figura 3 que a estrutura da otimização multiobjetivo é mais complexa que a otimização mono-objetivo, oferecendo contudo maior possibilidade de articulação do agente humano responsável pela decisão com o processo de busca pelas soluções ótimas. O bloco de tomada de decisão, que ocorre de forma explícita na otimização multiobjetivo como indicado, é o que representa essa intervenção do agente decisor, o qual pode introduzir suas preferências ou prioridades em diferentes fases do processo de otimização: seja inicialmente no modelo matemático, ou durante a aplicação do método de

busca pelo conjunto de soluções ótimas ou, ainda, sobre o conjunto de soluções ótimas já determinado pelo método de otimização.

Considerando o problema de minimização, um problema de OM tem a seguinte estrutura:

$$\min \quad \mathbf{z} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^T \quad (1)$$

Sujeito a

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x})]^T \leq \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [h_1(\mathbf{x}), h_2(\mathbf{x}), \dots, h_p(\mathbf{x})]^T = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{X} \quad (4)$$

$$\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_k]^T \in \mathbf{Z} \quad (5)$$

em que:

\mathbf{x} : vetor das variáveis de decisão de dimensão n ;

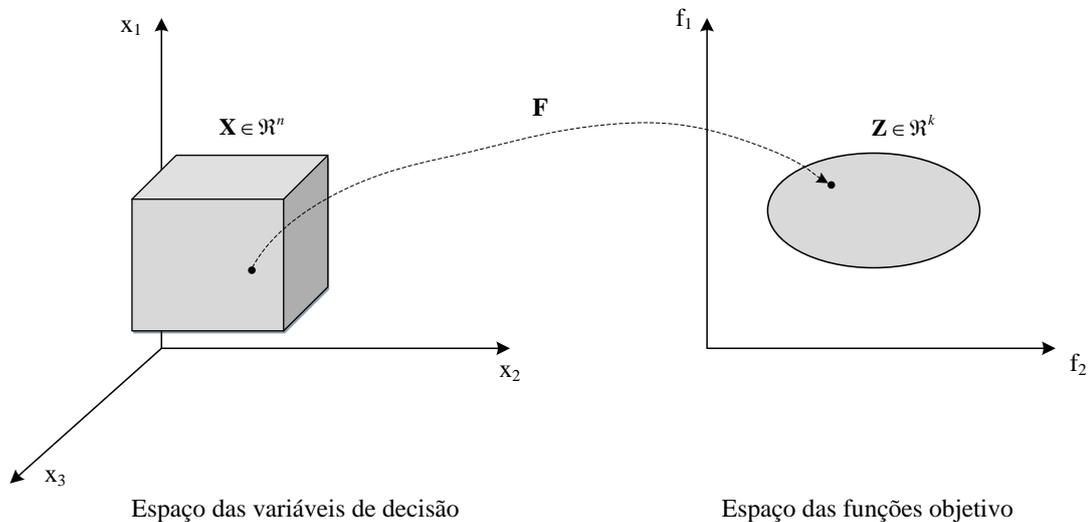
$\mathbf{z}, \mathbf{f}(\mathbf{x})$: vetor das funções objetivo de dimensão k ;

$\mathbf{g}(\mathbf{x})$: conjunto das restrições de desigualdade de dimensão m ;

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$: conjunto das restrições de igualdade de dimensão p .

As restrições dadas por (2) e (3) definem em \mathfrak{R}^n , o espaço das variáveis de decisão, a região factível \mathbf{X} e qualquer ponto $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ como uma solução factível. O espaço $\mathbf{Z} = \mathbf{f}(\mathbf{X})$ é a imagem de \mathbf{X} denominado região factível no espaço das funções objetivo. Esses conceitos estão apresentados na Figura 4 para $n = 3$ e $k = 2$, sendo $F: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Z}$.

Figura 4 – Mapeamento das variáveis de decisão no espaço das funções objetivo.



Fonte: Adaptada de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

No caso da otimização mono-objetivo, considerando a formulação generalizada dada pelas equações de (1) a (5), tem-se $k = 1$. Portanto a solução ótima, \mathbf{x}^{opt} , está associado um valor $f(\mathbf{x}^{\text{opt}})$ que corresponde ao valor mínimo no espaço das funções objetivo. Os métodos de otimização unidimensional valem-se da característica do conjunto de soluções factíveis ser totalmente ordenado, o que significa que todas as soluções factíveis são comparáveis por meio de seus respectivos valores da função objetivo. Assim, considerando-se duas soluções factíveis quaisquer \mathbf{x} e \mathbf{y} , pode-se definir que \mathbf{x} é superior a \mathbf{y} ($f(\mathbf{x}) < f(\mathbf{y})$), \mathbf{x} é inferior a \mathbf{y} ($f(\mathbf{x}) > f(\mathbf{y})$) ou de igual valor ($f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{y})$).

Já na otimização multiobjetivo, em que $k \geq 2$, o conjunto das alternativas é parcialmente ordenado, ou seja, todas as soluções factíveis não são necessariamente comparáveis com base nas funções objetivo. Sendo \mathbf{x} e \mathbf{y} duas soluções factíveis quaisquer e $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]$, pode ocorrer que, além das três situações observadas no caso da otimização mono-objetivo, \mathbf{x} e \mathbf{y} sejam incomparáveis se $f_1(\mathbf{x}) < f_1(\mathbf{y})$ e $f_2(\mathbf{x}) > f_2(\mathbf{y})$, por exemplo. Há então um conjunto de soluções ótimas no espaço das variáveis de decisão ao qual corresponde um conjunto de pontos no espaço das funções objetivo.

Assim, torna-se necessário expandir o conceito de otimalidade para os problemas de OM o que é feito a partir das definições de ótimo de Pareto e dominância de Pareto.

Definição 1 (Dominância de Pareto): Tomando soluções quaisquer $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{X}$ diz-se que \mathbf{x} domina \mathbf{y} se e somente se $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ é melhor que $\mathbf{f}(\mathbf{y})$ em pelo menos um objetivo f_i ($f_i(\mathbf{x}) < f_i(\mathbf{y})$, para o problema de minimização) e não é pior em nenhum outro objetivo f_j ($f_j(\mathbf{x}) \leq f_j(\mathbf{y})$, considerando o problema de minimização) com $i, j = 1, 2, \dots, k$ e $i \neq j$.

Definição 2 (Ótimo de Pareto): Um ponto $\mathbf{x}^{\text{opt}} \in \mathbf{X}$ é ótimo de Pareto se e somente se não há $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ tal que \mathbf{x} domine \mathbf{x}^{opt} .

Uma solução ótima de Pareto também pode ser designada por solução não dominada, eficiente ou não inferior. A Definição 2 garante que \mathbf{x}^{opt} é ótimo de Pareto se não há outro vetor factível \mathbf{x} que reduza algum objetivo sem causar elevação simultânea em pelo menos um dos outros objetivos (COELLO, 2000).

Definição 3 (Conjunto ótimo de Pareto): Conjunto único de todas as soluções não dominadas para um dado problema de otimização multiobjetivo.

Convém salientar que nesta tese aplica-se o termo conjunto ótimo de Pareto à solução obtida por um método de otimização multiobjetivo que, no caso das meta-heurísticas, não corresponde necessariamente ao conjunto ótimo de Pareto real.

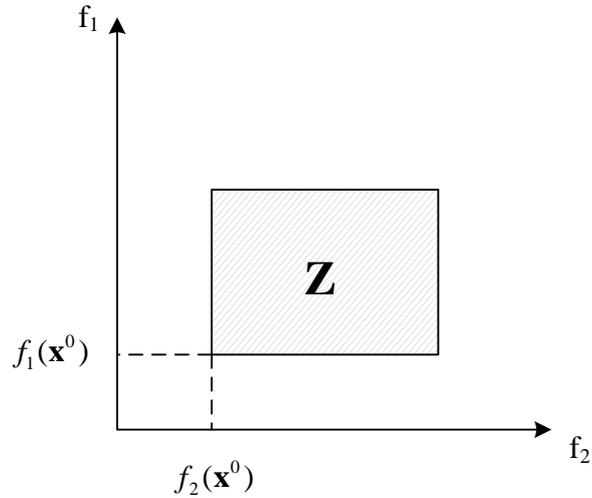
Definição 4 (fronteira de Pareto): A imagem do conjunto ótimo de Pareto no espaço das funções objetivo.

Definição 5 (Vetor Ideal): O vetor \mathbf{x}^0 é dito ideal se e somente se:

$$\mathbf{f}_j(\mathbf{x}^0) = \min \{ \mathbf{f}_j(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in \mathbf{X} \}, j = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

O vetor ideal é aquele que permite a cada uma das k funções objetivo atingir o seu ótimo, como mostrado na Figura 5 para $k = 2$.

Figura 5 – Representação do vetor ideal nos espaço das funções objetivo para $k = 2$.

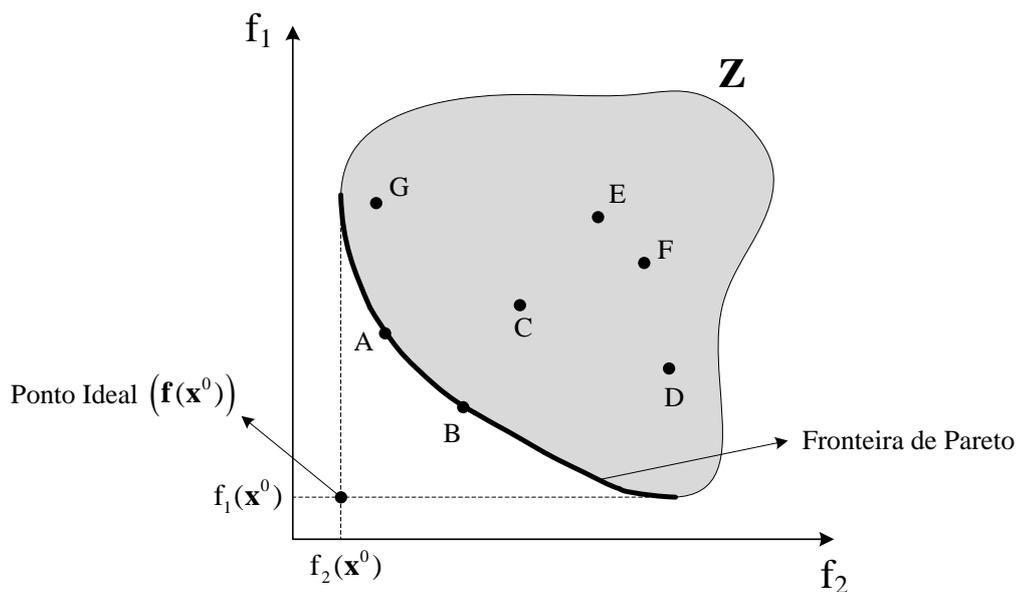


Fonte: Adaptada de Coello (2000).

Apesar de ser improvável a obtenção do vetor ideal como solução para um problema de otimização multiobjetivo, a sua definição é de maior interesse durante o processo de tomada decisão, visto que o decisor pode optar por pontos da fronteira de Pareto o mais próximo possível, segundo uma determinada métrica, do ponto ideal $\mathbf{f}(\mathbf{x}^0)$.

Na Figura 6 estão ilustrados os conceitos expostos.

Figura 6 – Ilustração dos conceitos de dominância e otimalidade de Pareto.



Fonte: Adaptada de Arroyo (2002).

Tomando-se, por exemplo, como referência o ponto C da Figura 6, pode-se determinar que ele domina os pontos E e F; é dominado pelos pontos A e B; não domina e nem é dominado pelos pontos D e G. Observando-se agora o ponto B, que pertence à fronteira de Pareto, nota-se que ele domina os pontos C, D, E e F; não domina e nem é dominado pelos pontos A e G; e não é dominado por qualquer outro ponto do espaço objetivo factível, inclusive pelos outros que pertencem à fronteira de Pareto.

Convém ainda apresentar outros conceitos e termos que serão amplamente utilizados. Durante o processo de OM é de fundamental importância o papel do agente humano identificado como decisor (*decision maker*). A ação deste pode ocorrer antes, depois ou mesmo durante a busca pelas soluções ótimas de Pareto. A definição das preferências do decisor ao longo do processo de otimização no sentido de escolher a solução final dentre as ótimas é chamada de tomada de decisão (*decision making*). Um outro conceito de suma importância é o de *trade-off*¹ que se refere ao compromisso entre objetivos em conflito ou ainda representa a quantidade de um objetivo que deve ser sacrificado de maneira a obter um ganho em outro objetivo (COHON, 2003).

3.2 Visão geral das metodologias de otimização multiobjetivo

Os métodos de OM podem ser classificados segundo variados critérios como a relação entre busca e tomada de decisão, ou a forma como operam os múltiplos objetivos e os mecanismos utilizados (COELLO, 2000; COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007; DEB, 2001). Nesta seção será dado maior enfoque sobre algumas propostas de classificação das metodologias existentes para o problema de OM e sobre a estrutura geral dos principais métodos.

3.2.1 Desenvolvimento dos métodos de otimização multiobjetivo

A nascente programação multiobjetivo de meados do século XX era baseada nas técnicas de otimização matemática clássicas, como pode ser observado numa versão multiobjetivo para o método Simplex ou no método NISE (COHON, 2003). Tais métodos têm garantias matemáticas de obtenção do conjunto de soluções ótimas condicionadas a determinadas condições específicas de modelagem do problema, como por exemplo linearidade das funções objetivo e das restrições ou convexidade do espaço de busca. Ainda

¹ Nesta tese optou-se por manter o termo em inglês. Uma tradução adequada de *trade-off* para o português seria a palavra compromisso.

considerando esses aspectos de formulação matemática, foram propostas metodologias com uma abordagem intuitiva do problema de OM, que consiste em operar com os múltiplos objetivos de forma que possa ser aplicado um método de otimização mono-objetivo. Duas dessas metodologias muito utilizadas são o Método da Soma Ponderada (*Weighted Sum Method*), que atribui pesos a todos os objetivos e os combina em uma única função, e o Método ϵ -Restrito, em que apenas um dos objetivos é escolhido para ser otimizado enquanto os demais são considerados como restrições adicionais de desigualdade limitadas pelo vetor ϵ . Os pesos do Método da Soma Ponderada e o vetor ϵ do Método ϵ -Restrito podem ser definidos segundo critérios de tomada de decisão prévia ou variados de forma a obter a fronteira de Pareto.

Outra abordagem que não tardou a ser aplicada aos problemas de OM e que vem sendo tema de intensa investigação atualmente nesse campo são os métodos baseados em meta-heurísticas. As primeiras propostas, assim como se deu com as metodologias baseadas em otimização matemática clássica, surgiram com as abordagens intuitivas em que meta-heurísticas formuladas para problemas de otimização mono-objetivo são executadas repetidamente de maneira a obter as soluções ótimas de Pareto. Os primeiros desenvolvimentos de algoritmos meta-heurísticos dedicados a problemas de OM ocorreram com os algoritmos evolucionários (AEs), como o método VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*), que ainda não chegava a incorporar conceitos de otimalidade de Pareto (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). A partir de então um considerável número de AEs foi desenvolvido basicamente com diferenças na forma de classificar as soluções baseada no conceito de dominância e nos mecanismos para garantir convergência e diversidade no conjunto solução. Desse grupo podem-se citar os métodos MOGA (*Multi-objective Genetic Algorithm*), NPGA (*Niched-Pareto Genetic Algorithm*), PAES (*Pareto Archived Evolution Strategy*), SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) e NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*). Há, além disso, uma segunda geração desses AEs com melhorias como os métodos NPGA 2, SPEA2 e NSGA-II, com destaque para os dois últimos em termos de desempenho e aplicação. Finalmente, há ainda intensa investigação no desenvolvimento de métodos baseados em diferentes meta-heurísticas com destaque para o PSO (*Particle Swarm Optimization*), Busca Tabu e *Simulated Annealing* (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007; DEB, 2001; REYES-SIERRA; COELLO, 2006). As meta-heurísticas multiobjetivo apresentam sobre as técnicas de programação matemática a vantagem de serem menos suscetíveis ao contorno ou continuidade das fronteiras de Pareto. No entanto, não há provas

matemáticas que demonstrem ser o conjunto de Pareto encontrado por esses métodos o conjunto real de Pareto para um dado problema de OM.

3.2.2 *Classificação dos métodos de otimização multiobjetivo quanto à tomada de decisão*

Como mencionado anteriormente, o processo de OM é composto de duas etapas básicas: determinação de soluções e tomada de decisão. Como essas etapas podem se dar em ordens diversas e isso tem impacto sobre o processo, os métodos podem ser classificados segundo a forma como estruturam a tomada de decisão e a determinação das soluções ótimas. Nesse sentido, como apresentado por Coello, Lamont e Veldhuizen (2007), os métodos podem ser classificados em três categorias:

- **Métodos a priori**

São caracterizados pela tomada de decisão antes de proceder com o processo de busca de soluções. Como exemplo, pode-se citar o método *Lexicographic Ordering* em que os objetivos são classificados em ordem de prioridade e o problema é resolvido segundo este ordenamento. O processo de otimização é realizado considerando apenas o primeiro objetivo. Em seguida, o problema é resolvido para o segundo objetivo considerando o primeiro como uma restrição de igualdade (o primeiro objetivo é mantido igualado ao valor ótimo encontrado na primeira etapa) e desconsiderando-se os demais. O processo é repetido até o último objetivo. Essa classe de métodos demanda bom conhecimento da natureza e formulação do problema por parte do decisor ao definir suas preferências que, no caso do método *Lexicographic Ordering*, correspondem a classificar as funções objetivo em ordem de importância.

- **Métodos a posteriori**

Nestes métodos, a tomada de decisão é realizada após a busca de soluções. O processo de busca não atribui qualquer diferenciação de importância entre os objetivos e ao final encontra o conjunto ótimo de Pareto real ou uma aproximação deste. Então pode ser realizada a escolha da solução mais adequada ao problema pelo decisor. Nessa definição encaixam-se um grande número de métodos dos mais primitivos como o Método da Soma Ponderada, aos baseados em meta-heurísticas como o método NSGA.

- **Métodos interativos**

O responsável pela decisão intervém durante o processo de busca do conjunto ótimo de Pareto, atribuindo suas preferências e orientando a busca para regiões de maior interesse a partir das soluções parciais obtidas.

3.3 *Análise de resultados*

Neste trabalho considera-se a tomada de decisão por um agente humano *a posteriori* no processo de OM, ou seja, ocorre após uma primeira etapa em que é identificado o conjunto de soluções ótimas de Pareto. Assim, é essencial que o método para determinação do conjunto ótimo de Pareto produza uma solução de boa qualidade. Deseja-se, idealmente, obter a fronteira de Pareto (FP) real, o que na prática com frequência não é possível devido à natureza ou formulação do problema, ou mesmo às limitações dos métodos. Em problemas com uma FP infinita, por exemplo, não é possível determinar todos os pontos da FP. O mesmo verifica-se em certas modelagens de problemas, tanto com uma FP finita quanto infinita, cuja complexidade exige a aplicação de ferramentas de otimização, como as meta-heurísticas, em que não há garantia matemática de convergência para a FP real. Portanto, para avaliar o desempenho de uma meta-heurística de OM deve-se mensurar sua capacidade de representar a FP real da melhor maneira possível com um número finito de pontos. Isso pode ser feito considerando-se três critérios para a FP obtida por um método: a convergência para a FP real; a distribuição uniforme dos pontos e a exploração das soluções extremas (DEB, 2001). Afinal, uma FP obtida pode, por exemplo, estar próxima da FP real mas não estar uniformemente distribuída ou não se aproximando das soluções extremas, o que representaria uma FP mal caracterizada para a tomada de decisão.

Essa avaliação da FP obtida por um método é feita de diversas maneiras. O método gráfico constitui talvez a alternativa mais intuitiva e direta, consistindo em comparar visualmente as fronteiras de Pareto obtidas. Há também um grande número de métricas que permitem indicar quantitativamente o desempenho de um método. O uso de métricas pode ser feito com ou sem o conhecimento da FP real e permite que os resultados sejam avaliados estatisticamente. Além disso, o desempenho dos métodos pode ser comparado utilizando-se testes estatísticos adequados para as características da amostra disponível (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

3.4 Meta-heurísticas de otimização multiobjetivo implementadas

Uma das principais etapas de uma metodologia de OM é a identificação de um método adequado para a determinação das soluções não dominadas. Optando-se pela análise das soluções ótimas *a-posteriori* e pelo uso das meta-heurísticas persiste ainda um considerável número de possibilidades, pela grande quantidade de métodos existentes com essas características (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). A partir da revisão bibliográfica destaca-se a quantidade considerável de trabalhos que empregam o método ϵ -Restrito, cuja aplicação ao problema de planejamento da GD, no entanto, vem sendo substituída principalmente por AEs de segunda geração, como o método NSGA-II (ALARCON-RODRIGUEZ; AULT; GALLOWAY, 2010). De fato, testes preliminares realizados pelo autor comparando os métodos ϵ -Restrito e NSGA-II demonstraram melhor desempenho deste último. Há, porém, carência na investigação de algoritmos desenvolvidos a partir de outras meta-heurísticas. Portanto, foi proposta a utilização de uma versão multiobjetivo do método Busca Tabu (BTMO), além do próprio NSGA-II, o que permitiu realizar uma comparação de desempenho entre os esses métodos e a versão multiobjetivo do método *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO) a ser apresentada no Capítulo 4. Assim, os métodos NSGA-II e BTMO são descritos em detalhes a seguir.

3.4.1 Método NSGA-II

O método NSGA-II, apresentado por Deb et al.(2002), é um Algoritmo Genético (AG) multiobjetivo que classifica as soluções segundo o conceito de dominância de Pareto. Desta forma, valendo-se de elementos dos AGs como a sucessão de gerações e a estrutura populacional, ao final do processo de otimização é obtido um conjunto de soluções não-dominadas a serem submetidas à tomada de decisão por um agente humano.

Os principais mecanismos introduzidos no algoritmo NSGA-II são:

- o elitismo, que garante a preservação de boas soluções no processo de busca;
- o procedimento *Fast Nondominated Sorting* (FNS) em que a população é classificada em diferentes níveis segundo a dominância de Pareto;
- o procedimento *Crowding Distance Assignment* (CDA) que visa a garantir a diversidade da população.

O mecanismo FNS define para cada solução p duas variáveis: um contador (np), que registra o número de soluções que dominam p , e o conjunto Sp das soluções que são

dominadas por p . Assim, cada solução é comparada com todas as outras da população. Caso uma solução p seja dominada por outra q , o contador np é incrementado; se p domina q , então a solução q é acrescentada ao conjunto Sp . Ao final desse processo todas as soluções da população terão a variável np e o conjunto Sp definidos. Segue-se então o passo de classificação das soluções segundo a dominância: todo indivíduo que possuir $np = 0$ não é dominado por nenhuma outra solução, sendo então agrupado na primeira fronteira de Pareto e recebendo um índice de classificação $rank = 1$. Portanto, ao final do procedimento FNS toda a população está classificada em fronteiras segundo o critério de não dominância, sendo que os elementos da mesma fronteira possuem o mesmo valor do índice de classificação $rank$. O atrativo deste procedimento está na sua simplicidade e eficiência computacional: à medida que é identificado um ponto p com $np = 0$, ele é agrupado numa fronteira e recebe o valor de $rank$, e cada solução q do conjunto Sp tem seu contador nq reduzido em uma unidade. Se esse decremento em nq faz com que ele seja nulo, o ponto q é automaticamente acrescentado à fronteira seguinte e o procedimento é então repetido. Ou seja, todo ponto já pertencente a uma fronteira não participa mais do processo de classificação.

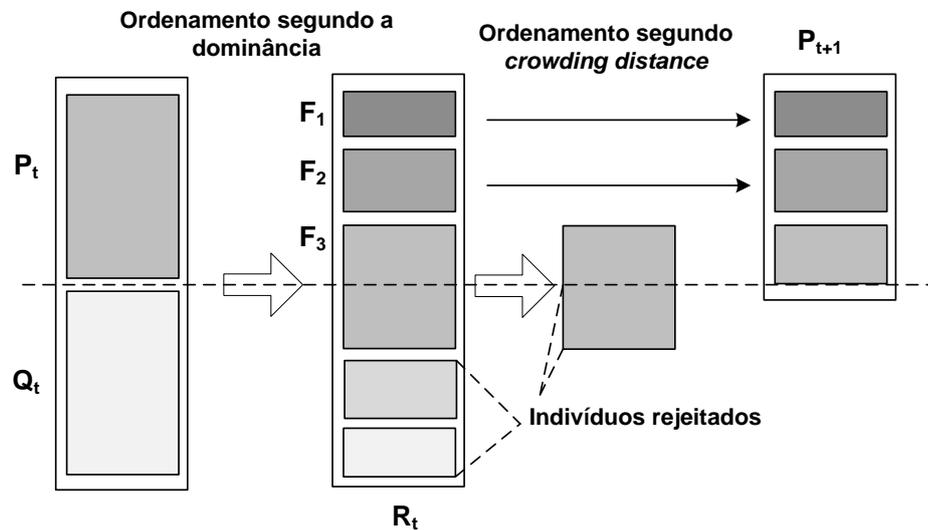
O mecanismo CDA é responsável por classificar os indivíduos de uma fronteira buscando manter a diversidade. Para tanto é estimada a densidade de soluções em torno de cada ponto de uma fronteira por meio de um índice, denominado aqui de *distance*. Tomando-se um ponto p , que pertence a uma determinada fronteira, o índice de concentração de soluções ao seu redor é obtido calculando-se a distância média entre p e outros dois pontos, um de cada lado de p , ao longo de cada função objetivo. Os pontos extremos da fronteira recebem um índice de distância infinito. Segundo esse critério, os pontos com o maior valor de *distance* estão em regiões com menor concentração de soluções, enquanto o menor valor de *distance* indica regiões mais “povoadas”.

Os mecanismos FNS e CDA combinados são usados para definir um operador, o *Crowded-Comparison Operator* (CCO), utilizado para comparar duas soluções. Esse operador prioriza o critério de dominância, ou seja, os pontos com menor valor de $rank$, e caso estejam na mesma fronteira de Pareto, o critério utilizado é então favorecer a diversidade, escolhendo-se o ponto da região com maior valor de *distance*. O operador CCO é componente fundamental do operador genético de seleção por torneio, visto que permite a escolha de uma solução num cenário de múltiplas funções objetivo.

O funcionamento geral do método NSGA-II consiste em gerar uma população inicial aleatória P_t de dimensão N e, por meio dos operadores genéticos, uma população de descendentes Q_t também de dimensão N . Essas populações P_t e Q_t são então combinadas,

formando um conjunto R_t com $2xN$ indivíduos. A população expandida é classificada segundo a dominância pelo procedimento FNS e a próxima população P_{t+1} já começa a ser composta pelos elementos de R_t com menor índice de dominância a começar pelos indivíduos não-dominados da fronteira 1 e assim por diante. Se a última fronteira a ter seus indivíduos acrescentados na população P_{t+1} tiver uma quantidade de soluções que, se somada àquelas já acrescentadas, exceder o tamanho N de P_{t+1} , os indivíduos excedentes são desprezados segundo o critério de diversidade, ou seja, aqueles com maior valor do índice *distance* são os escolhidos para compor P_{t+1} . Tal procedimento é ilustrado na Figura 7.

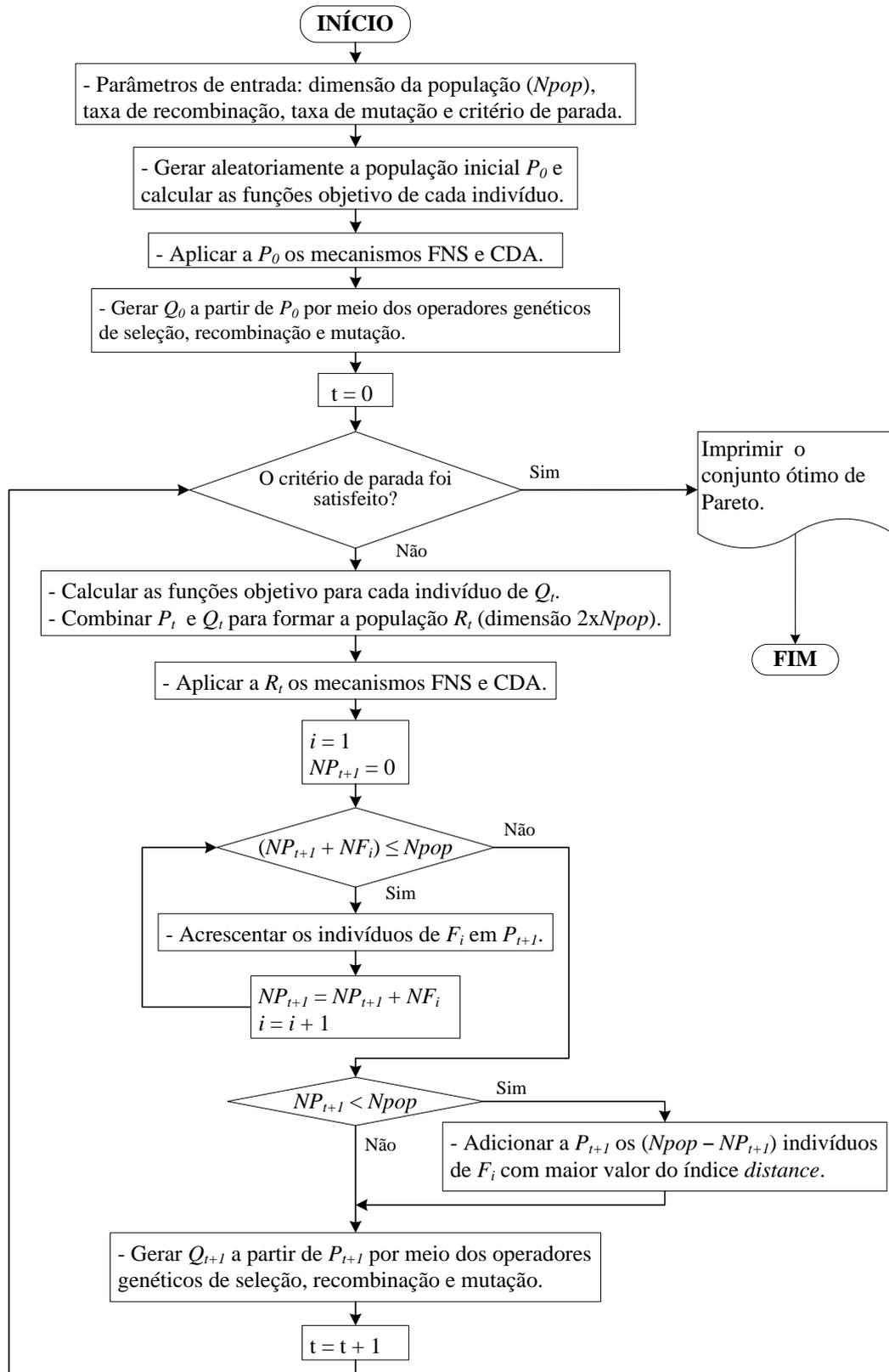
Figura 7 – Procedimento do método NSGA-II.



Fonte: Adaptada de Deb et al. (2002).

Enfim, definida a nova população P_{t+1} de dimensão N , é criada uma população de descendentes Q_{t+1} por meio dos operadores genéticos de seleção, recombinação e mutação. O processo é então repetido até que o critério de parada seja satisfeito. O algoritmo do método NSGA-II implementado é descrito no fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do método NSGA-II em que NP_{t+1} é a dimensão da população P_{t+1} e NF_i é a dimensão da fronteira F_i .



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4.2 Método Busca Tabu Multiobjetivo (BTMO)

O algoritmo de Busca Tabu (BT) é um método de busca em vizinhança orientado por uma série de mecanismos que restringem de forma inteligente o processo de determinação da solução ótima. Um algoritmo mono-objetivo básico de BT é iniciado com a definição de uma solução inicial aleatória e factível, chamada semente. A partir de uma estrutura de vizinhança predefinida, é determinado um conjunto de vizinhos e são avaliados os valores da função objetivo de cada um deles. Depois é executado o movimento para a melhor solução dentre as vizinhas, ainda que isso represente degradação da função objetivo com relação à semente, o que visa a evitar que a busca fique retida na região de um ótimo local. No entanto, esse procedimento não é suficiente para evitar ciclagem e dirigir a busca para novas regiões. Por isso a principal estratégia do método BT está na definição de uma memória dinâmica que registra atributos ou mesmo soluções dos últimos n movimentos de modo que fiquem proibidos temporariamente no processo de busca, sendo por isso classificados como tabu. O valor de n é prefixado podendo variar ou não ao longo do processo. Para evitar ainda que boas soluções sejam perdidas por terem atributos coincidentes com aqueles que estiverem na lista tabu, é definido um critério de aspiração que suspende a proibição em nome de uma melhoria desejável com relação ao melhor valor da função objetivo obtido até o momento, chamado de incumbente. O processo é finalizado quando o critério de parada é cumprido.

Baseado neste algoritmo é proposta uma abordagem para problemas de otimização multiobjetivo (BAYKASOGLU; OWEN; GINDY, 1994). Nela a geração da semente pode ser feita da mesma forma, bem como a etapa de geração da vizinhança. No entanto, os passos de seleção e atualização das soluções são consideravelmente remodelados, acomodando critérios de otimalidade de Pareto. Além da Lista Tabu (LT), são incluídas a Lista de Pareto (LP), destinada a reunir todas as soluções não-dominadas encontradas, e a Lista de Candidatos (LC) na qual são adicionadas as soluções não-dominadas que não foram escolhidas como semente numa determinada iteração. No fluxograma apresentado na Figura 9 está descrito o algoritmo do método BTMO, sendo alguns detalhes próprios do problema abordado neste trabalho acrescentados ao apresentado em (BAYKASOGLU; OWEN; GINDY, 1994).

Um processo que tem influência determinante no desempenho do método BTMO é a definição da estrutura de vizinhança. No trabalho de Nara et al. (2001), por exemplo, o método BT mono-objetivo é aplicado para a alocação ótima da GD e define-se como estrutura de vizinhança a retirada de um gerador instalado ou o acréscimo de uma unidade em uma posição em que não exista GD. Neste caso, é definida como estrutura de vizinhança a

alteração de posição de cada gerador da barra em que se encontra até uma outra dentro de um limite definido pelo usuário, através do parâmetro de entrada $step_i$ e da equação (7).

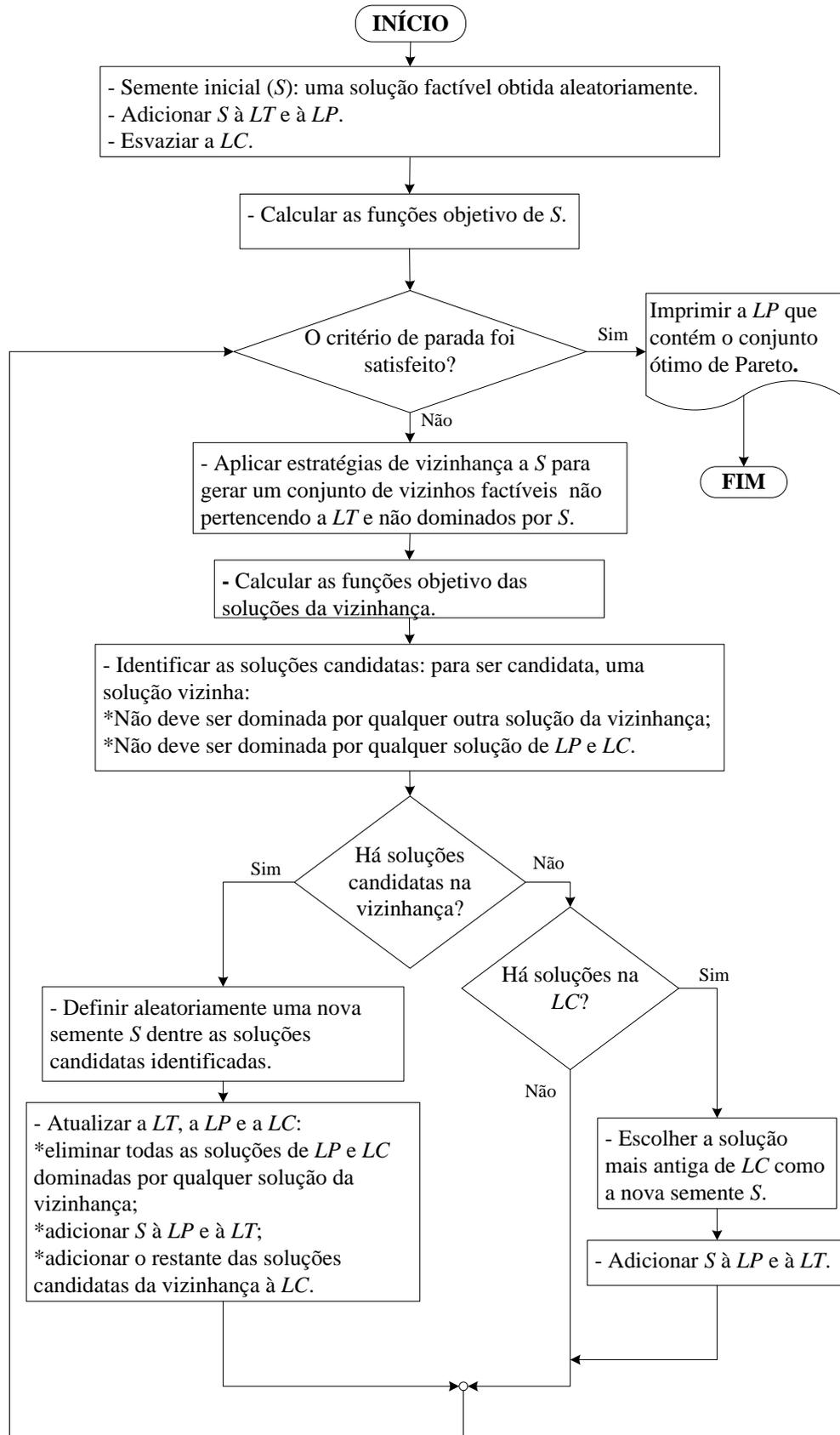
$$x_i^* = x_i + \text{inteiro}[(2 \times \text{random}() - 1) \times step_i] \quad (7)$$

Sendo:

- x_i^* : valor da variável i depois do movimento de vizinhança;
- x_i : valor da variável i antes do movimento de vizinhança;
- $\text{random}()$: variável aleatória com distribuição uniforme podendo assumir valores no intervalo $[0,1]$;
- $step_i$: tamanho do passo usado para executar o movimento de uma variável inteira.

A execução do método BTMO pode ser terminada quando LC está vazia e não é possível encontrar qualquer solução candidata após um número definido de tentativas, usando uma quantidade máxima de iterações ou de avaliações do vetor de funções objetivo.

Figura 9 – Fluxograma do método BTMO.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4 Proposta: método EPSO Multiobjetivo (MEPSO)

Como parte das investigações sobre as meta-heurísticas de OM, foi desenvolvida no âmbito desta tese uma técnica que consiste, basicamente, numa versão multiobjetivo do método *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO) (MIRANDA; FONSECA, 2002), chamada MEPSO. Foram incorporadas nesse método algumas das estratégias do método NSGA-II, como os mecanismos de classificação das soluções segundo a dominância, de atribuição de um índice de diversidade e de elitismo.

O método EPSO consiste numa combinação de estratégias dos AEs ao método *Particle Swarm Optimization* (PSO). A principal herança do PSO está na definição de um conjunto de partículas cujo movimento é orientado por dois termos: a posição atual e um vetor de velocidade. Esse método, assim como os AGs, apresenta característica desejável à otimização multiobjetivo, pois opera com um conjunto de soluções, o enxame de partículas. Além disso, aponta-se o desempenho superior do EPSO com relação aos AGs e ao PSO em alguns problemas mono-objetivos, inclusive de sistemas elétricos de potência (EGHBAL et al., 2007; MIRANDA; FONSECA, 2002).

Apresenta-se adiante, então, a proposta do método EPSO multiobjetivo (MEPSO), precedida por uma breve descrição do método EPSO.

4.1 O método EPSO

O método PSO básico procura reproduzir características do comportamento social de certos grupos de animais ou insetos como enxames, cardumes e bandos. A partir dessa concepção, definido um conjunto de partículas, o movimento de cada uma delas é determinado por três componentes: inércia (representa a tendência da partícula em continuar na mesma direção do último movimento); memória (refere-se à influência da melhor posição encontrada pela partícula ao longo do processo de busca) e cooperação (que é o efeito da melhor posição encontrada por todo o conjunto das partículas sobre o movimento de uma única) (MIRANDA; FONSECA, 2002). O movimento de uma partícula é descrito pelas equações (8) e (9).

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = w \cdot \mathbf{v}_i^k + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (\mathbf{Pb}_i - \mathbf{x}_i^k) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (\mathbf{Gb} - \mathbf{x}_i^k) \quad (9)$$

Em que:

- \mathbf{x}_i^k : a posição da partícula i na iteração k ;
- \mathbf{v}_i^k : a velocidade da partícula i na iteração k , dada por $\mathbf{v}_i^k = \mathbf{x}_i^k - \mathbf{x}_i^{k-1}$;
- w : função de ponderação referente ao termo de inércia;
- c_1, c_2 : pesos dos termos de memória e cooperação, respectivamente;
- $\text{rand}_1, \text{rand}_2$: valores aleatórios entre 0 e 1;
- \mathbf{Pb}_i : melhor posição encontrada pela partícula i desde o início até a iteração atual;
- \mathbf{Gb} : melhor posição encontrada em todo o conjunto de partículas desde o início até a iteração atual.

A função w é definida de forma que o termo de inércia seja reduzido de um valor máximo a um mínimo no decorrer do processo iterativo (FUKUYAMA, 2008).

No método EPSO une-se à estrutura do PSO um processo de seleção explícito e propriedades autoadaptativas de alguns parâmetros. O EPSO pode ser entendido também, do ponto de vista dos AEs, como um Algoritmo Evolucionário em que a reprodução se dá baseada na equação de movimento do método PSO. O algoritmo básico do EPSO consiste em (MIRANDA, 2008):

- Cada partícula é replicada uma vez, resultando em duas partículas por posição.
- Os pesos de cada partícula replicada sofrem mutação.
- As partículas original e replicada executam movimento segundo a equação de movimento do PSO.
- É aplicado o operador de seleção sobre ambas, preservando a melhor delas.
- O processo é repetido para todas as partículas.

A equação (9) é reescrita para o método EPSO na forma apresentada na equação (10).

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = w_{i0}^* \cdot \mathbf{v}_i^k + w_{i1}^* \cdot (\mathbf{Pb}_i - \mathbf{x}_i^k) + w_{i2}^* \cdot (\mathbf{Gb}^* - \mathbf{x}_i^k) \quad (10)$$

Em que w_{i0}^* , w_{i1}^* e w_{i2}^* representam respectivamente os pesos de inércia, memória e cooperação. O vetor \mathbf{Gb}^* é uma posição na vizinhança de \mathbf{Gb} dada por $\mathbf{Gb}^* = \mathbf{Gb}[1 + (w_{i3}^*)N(0,1)]$, sendo $N(0,1)$ uma variável aleatória que segue uma distribuição Normal com média nula e variância unitária. O asterisco representa as grandezas que devem sofrer mutação. Este operador genético ocorre pela composição de um valor obtido aleatoriamente segundo uma distribuição estatística, como a Normal ou a Log-normal, e de um parâmetro de aprendizado (σ), que pode ser fixo ou sujeito a mutação (MIRANDA; FONSECA, 2002), conforme a equação (11).

$$w_{ik}^* = w_{ik} + \sigma \cdot N(0,1) \quad (11)$$

O parâmetro de aprendizado considerado neste trabalho é fixo e igual a 0,2 (MIRANDA; KEKO; DUQUE, 2008).

4.2 O método MEPSO

O método MEPSO pode ser visto, de forma geral, como uma proposta híbrida que visa a explorar os ganhos de desempenho obtidos no método EPSO com alguns mecanismos próprios da OM utilizados pelo NSGA-II. Baseando-se no algoritmo básico de EPSO apresentado, as etapas de replicação e mutação foram integralmente preservadas em MEPSO. Entretanto, a atribuição de \mathbf{Pb} e de \mathbf{Gb} foram consideravelmente alteradas. A avaliação do vetor de funções objetivo e a seleção também foram adaptadas para a OM. O método MEPSO herdou algumas das melhorias implementadas no método NSGA-II, como os algoritmos de *Fast Nondominated Sorting* (FNS), *Crowding Distance Assignment* (CDA) e o operador *Crowded Comparison Operator* (CCO) usado para a seleção.

As regras de movimento de MEPSO são apresentadas pelas equações (12) e (13), baseadas na formulação apresentada por Miranda, Keko e Duque (2008), que utiliza uma variável estocástica (\mathbf{P}) para a comunicação do \mathbf{Gb} a todas as partículas do enxame.

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = w_{i0}^* \cdot \mathbf{v}_i^k + w_{i1}^* \cdot (\mathbf{Pb}_i - \mathbf{x}_i^k) + w_{i2}^* \cdot \mathbf{P} \cdot (\mathbf{Gb}_i^* - \mathbf{x}_i^k) \quad (13)$$

Sendo \mathbf{Gb}_i^* a posição transmitida a uma partícula i por outra para orientar o movimento no sentido da fronteira de Pareto ou de regiões menos exploradas. Diferentemente

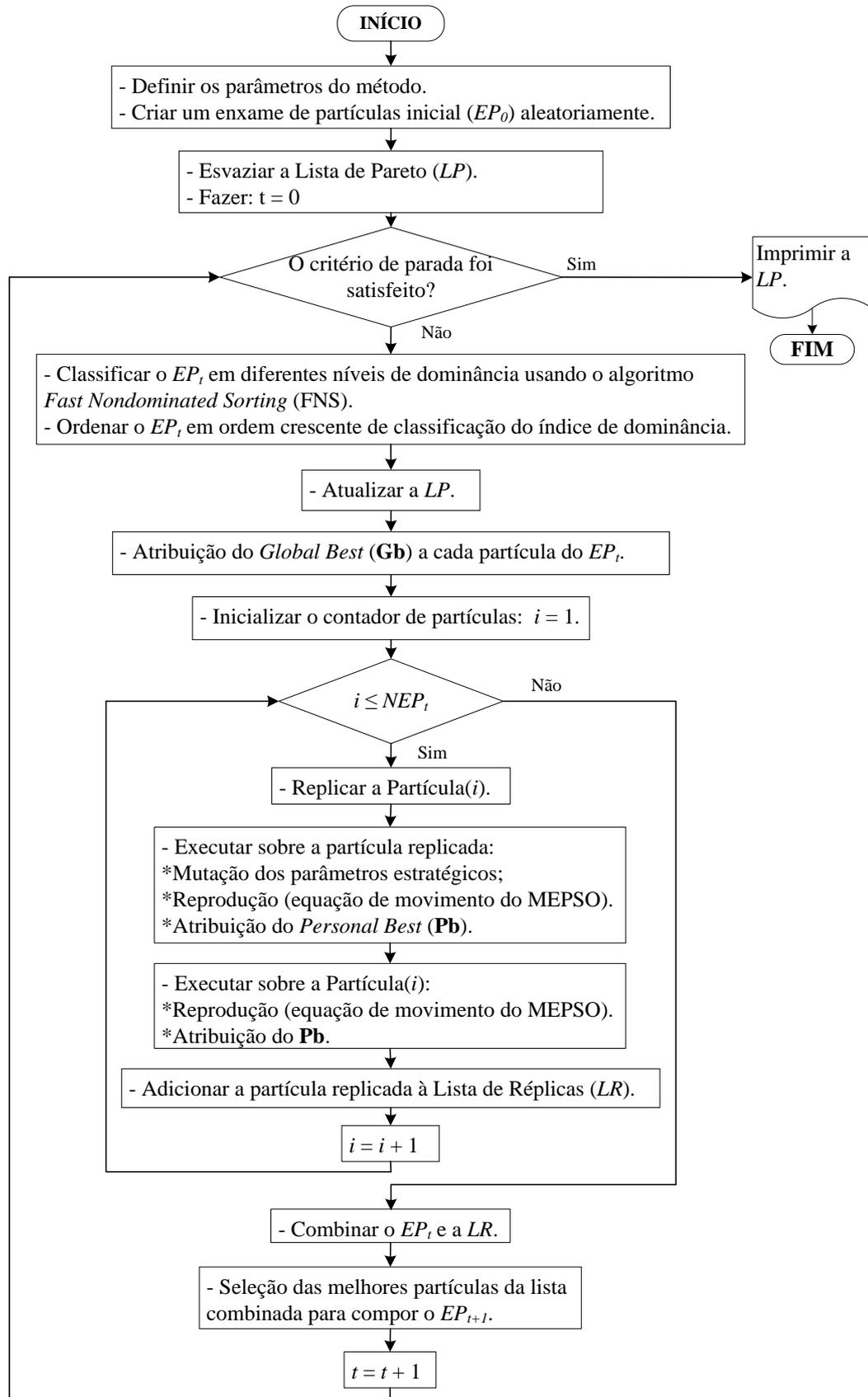
de EPSO, o \mathbf{Gb} no método MEPSO não é o mesmo para todas as partículas do enxame. A variável \mathbf{P} é uma matriz diagonal com elementos iguais a 1 segundo uma determinada probabilidade de comunicação p , ou 0 com probabilidade $(1 - p)$.

A inicialização do método permanece pouco alterada com relação à abordagem mono-objetivo. Usando como critério de parada o número máximo de iterações, o conjunto de partículas é, a cada iteração, classificado segundo a dominância. As soluções não-dominadas são candidatas a fazer parte da uma lista externa em que são mantidos os pontos da fronteira de Pareto, chamada de Lista de Pareto (LP). A seguir, é estabelecido um novo critério para a atribuição do \mathbf{Gb} a cada solução, pois não há mais uma única solução que possa ser definida como a melhor encontrada até a iteração corrente. Então cada partícula é duplicada e sobre a réplica é aplicado o operador de mutação sobre os pesos da equação (13). Ambas, partícula original e sua réplica, executam o movimento segundo as equações (12) e (13), mas, diferentemente da abordagem mono-objetivo, a seleção não é mais feita entre elas, obedecendo agora a uma estrutura de elitismo. Nesta estrutura a seleção ocorre sobre um conjunto estendido composto pelas partículas originais e suas réplicas, após todas executarem o movimento.

O algoritmo do método está apresentado no fluxograma da Figura 10 e seus principais detalhes são descritos em seguida.

Em (LI, 2003) é proposto um método PSO multiobjetivo baseado nos mecanismos do método NSGA-II. Diferentemente de MEPSO, essa abordagem não incorpora as estratégias evolucionárias de EPSO. Há ainda diferenças na atribuição de \mathbf{Gb} e de \mathbf{Pb} e na execução do elitismo.

Figura 10 – Fluxograma do método MEPSO, sendo NEP_t a dimensão do enxame de partículas EP_t .



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.1 Inicialização

Não há alteração substancial nesta etapa. O enxame de partículas e os pesos da equação de movimento de cada partícula são criados de forma aleatória; a lista externa (LP) é criada vazia; são definidos os parâmetros do MEPSO como tamanho do enxame e número máximo de iterações; e é acrescentada uma variável auxiliar útil no processo de definição do **Gb**, chamada *NGb*, a ser definida como dado de entrada do programa.

4.2.2 Classificação da população em diferentes níveis segundo a dominância

A classificação das soluções usando o conceito de dominância como critério pode ser feita de várias formas. Nesta proposta foi utilizado o algoritmo FNS de NSGA-II em que as soluções são classificadas em fronteiras segundo a quantidade de soluções que as dominam. As soluções não-dominadas recebem um valor relativo à primeira fronteira e o mesmo é feito a todas as soluções e suas respectivas fronteiras. O algoritmo em detalhes é apresentado por Deb et al. (2002).

4.2.3 Atualização da Lista de Pareto (lista externa)

Uma vez classificadas as partículas em fronteiras segundo a dominância, os pontos agrupados na primeira fronteira (não-dominados com relação aos demais) são candidatos a compor a LP. Essas soluções são comparadas às presentes na LP: aquelas dominadas ou repetidas devem ser excluídas, tanto do conjunto das candidatas quanto da LP. Por fim tem-se a lista externa atualizada. Este módulo deve receber a lista de partículas depois de submetida a FNS e já classificada em ordem crescente com relação ao índice de fronteira atribuído em FNS.

4.2.4 Atribuição de *Gb*

Esta função atribui o **Gb** a cada partícula. Dois algoritmos foram propostos.

No primeiro deles, uma partícula da fronteira f recebe como **Gb** o ponto da fronteira ($f - 1$) mais distante segundo uma determinada métrica. Na equação (14) está apresentada a métrica utilizada que define a distância entre dois pontos p^0 e p^1 como a máxima diferença dentre todas as obtidas considerando cada uma das dimensões dos vetores das funções objetivo de p^0 e p^1 . Os valores das diferenças das funções objetivo foram normalizados para

permitir a comparação com valores de diferentes ordens de grandeza. Esta é uma métrica equivalente à L_∞ (MIRANDA; PROENÇA, 1998).

$$d(p^0, p^1) = \max_{1 \leq i \leq N_{obj}} \left(\left| \frac{F^1(i) - F^0(i)}{\max F(i) - \min F(i)} \right| \right) \quad (14)$$

Em que:

$d(p^0, p^1)$: representa a distância entre as partículas p^0 e p^1 ;

$F^1(i), F^0(i)$: valor da função objetivo i das partículas 1 e 0, respectivamente;

$\max F(i), \min F(i)$: valores máximo e mínimo, respectivamente, da função objetivo i da fronteira ($f - 1$);

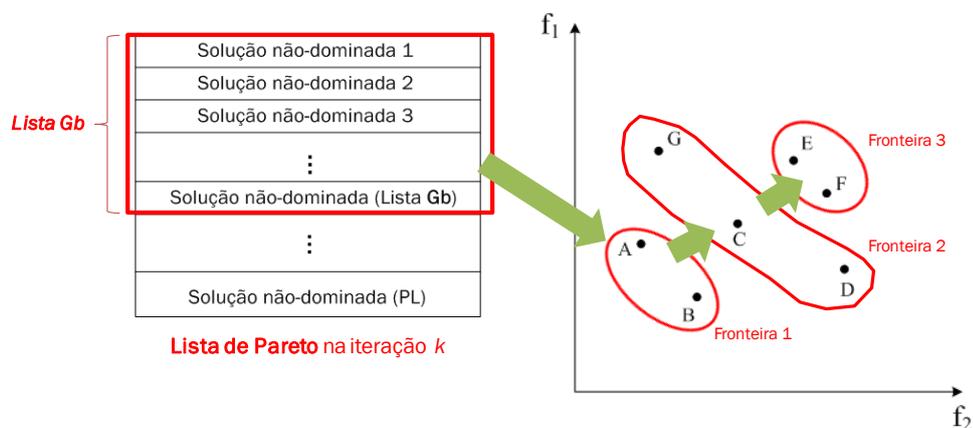
N_{obj} : número de funções objetivo do problema.

Quanto às soluções da primeira fronteira, a elas é atribuído um ponto da LP como **Gb**. Faz-se a escolha de forma aleatória, mas sem considerar toda a LP: um grupo reduzido de pontos candidatos (*Lista Gb*), com tamanho predefinido (*NGb*), é estabelecido em que todos têm a mesma probabilidade de serem **Gb**. O critério de escolha das partículas de LP para a *Lista Gb* procura favorecer a diversidade através do indicador *distance* atribuído em CDA. Enfim, são escolhidos para a *Lista Gb* as soluções com o maior valor do índice *distance*, indicando a preferência por explorar regiões pouco ocupadas, o que faz com que os pontos extremos de LP sempre estejam presentes. O algoritmo de atualização de **Gb** está descrito a seguir, sendo *NFront* o número de fronteiras em que o conjunto das partículas está dividido.

- (1) Entrada: lista de partículas.
- (2) Ordenar a lista de partículas segundo a classificação de dominância.
- (3) Inicializar o contador de frentes: $i = NFront$.
- (4) Enquanto $i > 1$ fazer:
 - (5) Para cada partícula p da Fronteira(i) fazer:
 - (6) Atribuir como **Gb** de p a partícula de Fronteira($i - 1$) mais distante de p segundo a equação (14).
 - (7) $i = i - 1$.
 - (8) Fim para.
 - (10) Fim enquanto.
 - (11) Aplicar CDA a LP.
 - (12) Compor *Lista Gb* com as *NGb* soluções de LP que receberam os maiores valores do índice *distance*.
 - (13) Para cada partícula p da Fronteira(1) fazer:
 - (14) Atribuir como **Gb** de p um ponto de *Lista Gb* escolhido aleatoriamente.
 - (15) Fim para.

A segunda estratégia de atribuição do **Gb** tem a mesma estrutura básica da primeira, mostrada na Figura 11. Contudo é mais simples porque evita o cálculo da distância, escolhendo a solução da fronteira seguinte de forma aleatória.

Figura 11 – Estrutura de atribuição do **Gb** para o método MEPSO.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.5 Definição do P_b

Cada vez que uma partícula efetua o movimento, o seu P_b é atualizado: a solução corrente é assumida como P_b caso não seja dominada pelo P_b atual. Dito de forma equivalente, é escolhida como P_b a última solução não-dominada encontrada pela partícula ao longo de sua trajetória.

4.2.6 Seleção

A seleção entre a partícula original e sua réplica não consiste mais na simples comparação entre ambas. Após todas as partículas executarem o movimento, as listas original e de réplicas são combinadas, o que neste caso corresponde à composição de um conjunto com o dobro do número de partículas. A lista combinada é então submetida ao procedimento FNS. À semelhança da estratégia elitista empregada por Deb et al. (2002), a nova lista de partículas selecionadas é constituída priorizando o índice de dominância e depois a diversidade. Assim, são adicionadas as soluções a partir da fronteira 1. Se o acréscimo de todos os pontos de uma fronteira faz com que a lista de partículas exceda seu tamanho, as posições restantes da lista são então preenchidas pelas soluções dessa fronteira com os maiores valores do índice atribuído pelo CDA.

4.2.7 Discussão sobre o MEPSO

A estrutura apresentada nesta proposta de versão multiobjetivo para o método EPSO pode ser remodelada, de maneira mais ou menos radical, em muitos dos seus aspectos.

É fato que num contexto de otimização multiobjetivo a comparação entre soluções e o conceito de otimalidade não são triviais como na otimização mono-objetivo. Torna-se assim necessária a definição de mecanismos que considerem os múltiplos objetivos, sejam capazes de julgar soluções segundo os critérios de ótimo de Pareto, promovam a obtenção de um conjunto de pontos diversificados e próximos da fronteira real de Pareto. Portanto, a definição desses mecanismos e sua adequação ao método podem ser matéria de investigação. Optou-se aqui pela identificação de fronteiras classificadas segundo um índice de dominância e pela avaliação de diversidade baseada no cálculo de *crowding distance*. Para tanto, foram empregados algoritmos relatados por Deb et al. (2002) que já haviam sido propostos em certa medida para superar algumas características indesejáveis do predecessor do método NSGA-II, o método NSGA, que utilizava, por exemplo, um mecanismo de diversificação dependente da

definição de um parâmetro pelo usuário. Mesmo assim, melhorias podem ser alcançadas através de outras metodologias como a aplicação do conceito de ϵ -dominância apresentado por Laumanns et al. (2002).

Outras etapas do algoritmo cuja alteração pode ter impacto considerável sobre o desempenho são a seleção e a atualização do **Gb**. Esta última teve sua concepção razoavelmente alterada nesta proposta com relação ao algoritmo mono-objetivo: não há mais uma única partícula considerada como **Gb** a orientar todas as demais igualmente (modelo conhecido como topologia *Star Communication* ou *Star network*), mas cada partícula tem seu próprio **Gb**. A escolha de soluções da próxima fronteira como **Gb** visa a retardar o processo de convergência das partículas, que às vezes ocorre rapidamente para regiões de ótimos locais no método PSO. Já a opção pela mais distante ou pela escolha aleatória cumpre o papel de diversificação, buscando promover a visita a distintas regiões do espaço de busca. Há ainda os pontos da primeira fronteira que recebem como **Gb** uma solução escolhida aleatoriamente de um subgrupo da LP de forma a estimular uma busca intensificada ao longo da fronteira de Pareto. Tal estrutura precisaria ser comparada a outras para verificação de eficiência. As mudanças podem ser tanto superficiais, como a adoção de outra métrica de distância, quanto aprofundadas como adotar outra topologia de comunicação entre as partículas (mesmo a *Star Communication*).

Quanto à seleção, a simples comparação entre uma partícula e sua réplica não é suficiente, visto que não necessariamente uma dominará a outra. Na busca de um segundo critério de preferência, como a diversidade, é preciso que as soluções sejam comparadas em grupo e não apenas aos pares. A seleção implementada cumpre este papel e permite que as melhores soluções dentre as partículas e suas réplicas sejam escolhidas. Todavia, isso implica, certas vezes, que uma partícula e sua réplica sejam selecionadas e ocorra a perda de informação de outras partículas. Assim, uma proposta imediata de modificação nesta etapa seria de manter a classificação das partículas em conjunto, porém realizar a comparação apenas entre uma solução e sua réplica.

5 Metodologia e Modelos de Otimização Multiobjetivo para Avaliar o Impacto da Geração Distribuída

A concepção de um problema de otimização numa abordagem multiobjetivo difere de um modelo mono-objetivo basicamente na definição de um vetor de objetivos e no processo de tomada de decisão. A definição do vetor de objetivos não está relacionada apenas à quantidade de atributos, mas principalmente à relação de conflito entre eles, conhecida ou que se queira investigar, que justifique o uso de uma formulação multiobjetivo. Com relação às metodologias e modelos encontrados na literatura de OM aplicados à alocação ótima da GD ou à avaliação de impacto causado pela GD, há diversas abordagens propostas e maneiras de se formular o problema dependendo do tipo de análise a ser realizada.

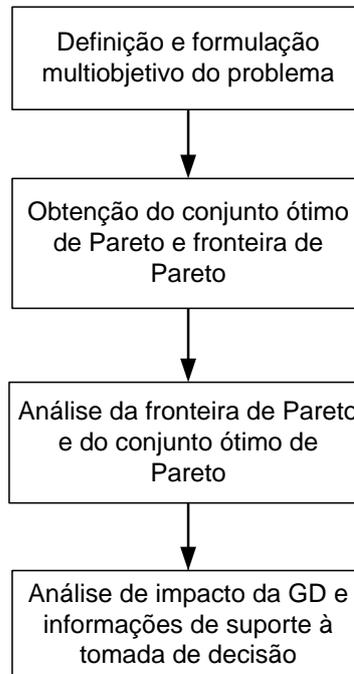
Neste capítulo é apresentada uma metodologia que consiste numa análise da fronteira de Pareto (FP) que permite, além da obtenção das condições de melhor *trade-off*, a identificação de padrões de impacto da GD com relação a características das unidades geradoras como posição e capacidade, por exemplo. O conjunto de informações obtido a partir dessa análise pode ser utilizado como parte de um estudo de impacto da GD, na avaliação do investimento na geração por parte da concessionária para a adequação da rede de distribuição ou na elaboração de cenários no planejamento da expansão da distribuição. Uma vez apresentada a metodologia, segue-se a definição de dois modelos de OM, elaborados considerando os atributos e critérios relacionados ao impacto da GD descritos no Capítulo 2, que permitem a exploração da abordagem proposta.

5.1 Metodologia de avaliação de impacto da GD baseada na avaliação da fronteira de Pareto

Partindo-se de uma determinada formulação de um problema de OM e da obtenção de seu conjunto de soluções ótimas de Pareto, a abordagem proposta nesta tese está orientada no sentido de identificar, por meio da análise da FP, o impacto causado pela penetração da GD e estabelecer através do conjunto ótimo de Pareto possíveis padrões de conexão e geração que possam ser relevantes no estudo de impacto da GD. Portanto, embora para o caso de avaliação da alocação ótima a ser proposto identifique-se um subconjunto final de solução com o melhor compromisso, pode-se ainda obter informação adicional por meio da análise do conjunto ótimo de Pareto e da FP. Isso faz com que a análise dos resultados a ser apresentada

não corresponda a uma metodologia típica de OM em que o processo de otimização está concluído com a identificação da solução de melhor compromisso. Essa proposta está sintetizada na Figura 12.

Figura 12 – Síntese da metodologia multiobjetivo de análise de impacto da GD.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A etapa de definição e formulação multiobjetivo do problema consiste em estabelecer um modelo matemático definindo os objetivos, restrições e variáveis de decisão. O conjunto de soluções ótimas de Pareto e da FP é obtido aplicando-se um método de OM ao modelo formulado.

A análise do conjunto ótimo de Pareto inicia-se pelo estudo da FP no sentido de observar os valores obtidos para as funções objetivo, buscando-se agrupar pontos segundo o impacto causado pela GD. Essa classificação das soluções depende das definições do problema e pode ser feita inclusive de forma aleatória, sendo conveniente, contudo, que incorpore alguma informação das preferências do decisor. Definidos os grupos de pontos no espaço das funções objetivo segundo avaliação de impacto da GD pretendida, é feita então a análise do conjunto ótimo de Pareto que, por ser definido no espaço das variáveis de decisão, permite estabelecer padrões de conexão e geração relacionados aos pontos classificados utilizando a FP. Assim, é possível relacionar os impactos da GD à posição e injeção de

potência das unidades geradoras, considerando um determinado conjunto ótimo de Pareto obtido.

Finalmente, a fase de informações de suporte à tomada de decisão corresponde aos resultados obtidos na etapa anterior e como podem ser aproveitados pelo decisor, seja na identificação das condições ótimas de conexão da GD ou na obtenção da extensão do impacto, tanto negativo quanto positivo, que a GD pode causar em condições de livre acesso à rede. Além disso, essas informações obtidas podem servir em estudos de elaboração de regulamentação que busque dividir com clareza, entre os agentes envolvidos, os benefícios e investimentos relacionados à penetração da GD e ainda no planejamento da expansão da distribuição fornecendo, por exemplo, dados para a composição de cenários que incluam os efeitos da GD como incerteza.

Nesses termos, são propostos a seguir dois modelos: o primeiro deles, mais simplificado, é usado para os testes de desempenho das meta-heurísticas de OM e para a análise de alocação e dimensionamento ótimos da GD. Neste caso, a metodologia possibilita a obtenção das condições, nós de conexão e capacidade dos geradores, otimizadas de penetração da GD com relação a dois índices técnicos, o que seria interessante numa situação em que a concessionária dispusesse de total controle na conexão dos geradores, por exemplo. O segundo visa a investigar um problema comumente referido e pesquisado com relação à inserção da GD nas redes de distribuição, que é a possibilidade de ganhos de capacidade na rede e adiamento dos investimentos em infraestrutura. Através deste modelo é ainda proposta uma abordagem alternativa na etapa de análise do conjunto ótimo de Pareto e da FP. Fez-se uma análise do impacto da GD sobre a capacidade da rede, relacionada à posição dos geradores e nível de geração, considerando-se não apenas as condições de melhoria dos objetivos definidos, mas também as condições extremas de impacto negativo. Por meio desta avaliação pretende-se obter as condições extremas de impacto positivo e negativo que podem ser obtidas com a penetração da GD. Esse conjunto de informações pode servir para uma análise de impacto ou mesmo ser aproveitada no planejamento da expansão num contexto em que a concessionária não dispõe de controle sobre o acesso da GD à rede de distribuição.

Ambos os modelos são aplicados a duas redes de distribuição radiais com características distintas adaptadas a partir dos alimentadores IEEE-123 e IEEE-34 (KERSTING, 2001). A rede IEEE-123 é urbana apresentando linhas curtas e um nível de desequilíbrio entre as fases e carregamento maiores que a rede IEEE-34 caracterizada por ser um alimentador rural longo. Por não se tratar das redes IEEE-34 e IEEE-123 originais, elas serão identificadas por rede de distribuição de média tensão 34 (RDMT34) e rede de

distribuição de média tensão 123 (RDMT123) mantendo a numeração 34 e 123 como referência às redes originais, o que não corresponde ao número de nós das redes adaptadas. A descrição completa das redes é apresentada no Capítulo 6.

A seguir, são apresentados os dois modelos, alguns detalhes da metodologia de avaliação do desempenho das meta-heurísticas de OM e as ferramentas computacionais de cálculos elétricos empregadas.

5.2 Modelos de OM para a avaliação de impacto da GD

Há diversas abordagens encontradas na literatura em que se busca, de forma geral, aplicar modelos e métodos de OM para avaliar ou lidar com os impactos relacionados à penetração da GD nas redes de distribuição. Em geral são considerados objetivos estritamente técnicos, como a minimização de perdas ou regulação de tensão (CARPINELLI et al., 2005; OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2006), ou econômicos refletindo custos e ganhos relacionados a perdas, geração de energia ou confiabilidade (CELLI et al., 2005), podendo ainda ocorrerem índices de outra natureza como emissões de CO₂ (ALARCON-RODRIGUEZ et al., 2009). O aspecto dinâmico da carga é normalmente considerado por meio de curvas de carga mais detalhadas, com comportamento anual e sazonal (OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2008a), ou simplificada em alguns patamares representativos (HARRISON et al., 2007). O nível de geração é considerado como variável de decisão por Alarcon-Rodriguez et al. (2009), em termos de percentual gerado por nó, podendo ser também fixado na potência nominal do gerador (HARRISON et al., 2007) ou mesmo um dado de entrada na forma de curvas de geração, principalmente para as renováveis (OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2008b). Quanto às restrições, há algumas definidas especificamente dependendo da formulação do problema, entretanto considera-se comumente os níveis de tensão, os limites das correntes dos cabos e de potência na SE, os limites de geração e o fator de potência do gerador. Em termos de análise e tomada de decisão, para os problemas de alocação e dimensionamento ótimos da GD busca-se como solução final a posição e nível de geração otimizadas (CARPINELLI et al., 2005; CELLI et al., 2005; OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2008b), contudo no caso de Harrison et al. (2007) interessa a capacidade ótima da GD, previamente alocada, para uma solução de compromisso entre os incentivos pagos aos operadores da geração e da rede elétrica. Há ainda abordagens (ALARCON-RODRIGUEZ et al., 2009; HAESSEN et al., 2009) em que interessa

o conjunto de soluções ótimas, com relação ao nível de geração otimizado por nó, para ser analisado.

Considerando-se essas abordagens encontradas na literatura, é apresentado a seguir como alguns dos aspectos técnicos apresentados no Capítulo 2, relacionados aos impactos técnicos da GD, são considerados nos dois modelos propostos. Foi assumida uma condição no horizonte de planejamento em que o crescimento da demanda coincidissem, na condição de pico, com os valores nominais das cargas, o que resulta numa rede elétrica inadequada do ponto de vista da tensão, para ambas redes elétricas consideradas, e da corrente para a rede RDMT123.

5.2.1 Modelo para o problema de alocação ótima da Geração Distribuída

O problema a ser analisado consiste em alocar e dimensionar de forma otimizada um conjunto de geradores em uma rede de distribuição. São definidos, inicialmente, os tipos de geradores disponíveis e a quantidade de cada um deles, que devem obrigatoriamente ser alocados, sendo restrita a conexão a não mais do que uma unidade de GD por nó. Essas condições estabelecidas para a conexão dos geradores fazem com que o espaço de busca seja finito e, no caso dos testes realizados, possa ser definido, o que foi aproveitado na análise comparativa entre os métodos de OM. No entanto, para uma avaliação mais ampla do impacto da GD pode-se permitir, por exemplo, que a quantidade de unidades geradoras alocada seja variada até um valor máximo predefinido. Para a GD foi considerado um único cenário de geração firme e constante no valor nominal da unidade geradora, ou seja, a operação no modo fator de potência constante e fixo assim como por Harrison et al. (2007).

Foram consideradas ainda as restrições de tensão e limite de corrente nos cabos. Sobre as funções objetivo, foram definidas duas referentes a critérios técnicos de nível de perdas e nível da corrente de curto-circuito.

Função objetivo 1: Perda de potência ativa trifásica (ILp)

A inserção de unidades geradoras na rede de distribuição pode tanto aumentar quanto reduzir os níveis de perda. Portanto a função objetivo representada pela equação (15) avalia o impacto da GD sobre as perdas de potência ativa totais da rede (OCHOA, 2006). Por se tratar de uma rede desequilibrada, a perda ativa trifásica é determinada pela soma das perdas ativas de cada fase.

$$IL_p = \frac{Perdas^k}{Perdas^0} \quad (15)$$

Sendo:

$Perdas^k$: perdas totais de potência ativa nas linhas para a configuração k dos geradores na rede de distribuição.

$Perdas^0$: perdas totais de potência ativa nas linhas para a rede de distribuição sem GD.

Função objetivo 2: Curto-circuito trifásico (ISC3)

O índice de curto-circuito trifásico visa a avaliar a máxima taxa da corrente de curto-circuito entre os cenários com e sem GD, visto que a alocação de geradores na rede de distribuição tem um impacto direto sobre a proteção e seletividade. Pela equação (16) define-se o valor da função objetivo baseado nos níveis de curto-circuito trifásico que, apesar de pouco frequentes, são os de maior gravidade (OCHOA, 2006). Além disso, o perfil de correntes de curto-circuito apresenta a mesma tendência para os diversos tipos de faltas (SHORT, 2003).

$$ISC3 = \max \left(\frac{I_{scabc_i^k}}{I_{scabc_i^0}} \right)_{i=1}^{NN} \quad (16)$$

Em que:

$I_{scabc_i^k}$: valor da corrente de falta trifásica no nó i para a configuração k da GD na rede de distribuição;

$I_{scabc_i^0}$: valor da corrente de falta trifásica no nó i para a rede de distribuição sem a GD;

NN : número de nós da rede.

A formulação do problema é definida pelas equações (17).

$$\begin{array}{l}
 \text{Min ILp} \\
 \text{Min ISC3} \\
 \left. \begin{array}{l}
 P_i = \sum_{j \in NC_i} P_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) \quad i = 1, \dots, NN \\
 Q_i = \sum_{j \in NC_i} Q_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) \\
 s.a. \left\{ \begin{array}{l}
 0,95 \cdot V_N \leq |V_i^{GD}| \leq 1,05 \cdot V_N \\
 |I_k^{GD}| \leq I_k^{\max} \quad k = 1, \dots, NR \\
 \cos \varphi_g = 1 \quad g = 1, \dots, NGD
 \end{array} \right.
 \end{array} \right. \quad (17)
 \end{array}$$

Sendo:

NN : número de nós da rede;

P_i, Q_i : injeção líquida de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra i ;

P_{ij}, Q_{ij} : respectivamente, fluxo de potência ativa e reativa no ramo $i - j$;

V_i, θ_i : magnitude e ângulo da tensão na barra i ;

NC_i : conjunto dos nós vizinhos ao nó i ;

V_N : magnitude da tensão nominal;

V_i^{GD} : tensão na barra i para uma determinada configuração da GD;

I_k^{GD} : corrente no ramo k para uma determinada configuração da GD;

I_k^{\max} : máxima corrente para o ramo k ;

NR : número de ramos da rede;

NGD : número de unidades geradoras.

Cabe ressaltar que utilizou-se um limite mínimo para a tensão de 0,95 da tensão nominal, embora para ANEEL (2012) seja estabelecido 0,93 da tensão nominal como limite mínimo para a tensão adequada na média tensão de distribuição.

Foi considerado um único cenário de carga e de geração. Dois geradores devem ser alocados em cada rede com os seguintes valores de potência trifásica nominal: um de 100 kW e outro de 200 kW para a rede RDMT34; e um de 200 kW e outro de 400 kW para a rede

RDMT123. Isso corresponde a aproximadamente a mesma penetração da geração com relação à carga para ambas as redes como detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Nível de penetração da GD por fase e total para cada rede elétrica.

Rede elétrica	Geração/Carga (%)			
	Fase A	Fase B	Fase C	Total
RDMT123 (200 e 400 kW)	42,2	65,6	51,9	51,6
RDMT34 (100 e 200 kW)	49,7	51,2	51,8	50,9

Fonte: Alguns dados adaptados de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a, 2000b).

A escolha de uma modelagem simplificada do problema permite que todo o espaço de busca possa ser definido, correspondendo ao número de combinações possíveis das unidades de GD entre os nós disponíveis da rede. Isso possibilita uma melhor verificação da metodologia e é também aproveitado na avaliação de desempenho das meta-heurísticas de OM, visto que a FP real é conhecida. O critério de parada usado foi o número máximo de avaliações das funções objetivo (MIRANDA; KEKO; DUQUE, 2008) e foi definido como sendo uma percentagem da quantidade de soluções do espaço de busca, aproximadamente 40% e 80%, com objetivo de avaliar, respectivamente, o desempenho dos métodos com um número reduzido de iterações e permitindo-se um número de avaliações das funções objetivo mais próximo do total possibilidade do espaço de busca. Os dados sobre as redes elétricas e espaço de busca estão reunidos na Tabela 3, em que os valores do espaço de busca representam o total de combinações possíveis das unidades de GD entre os nós de cada rede elétrica, excluindo-se a barra da SE e sem permitir que mais de uma unidade geradora seja conectada num mesmo nó.

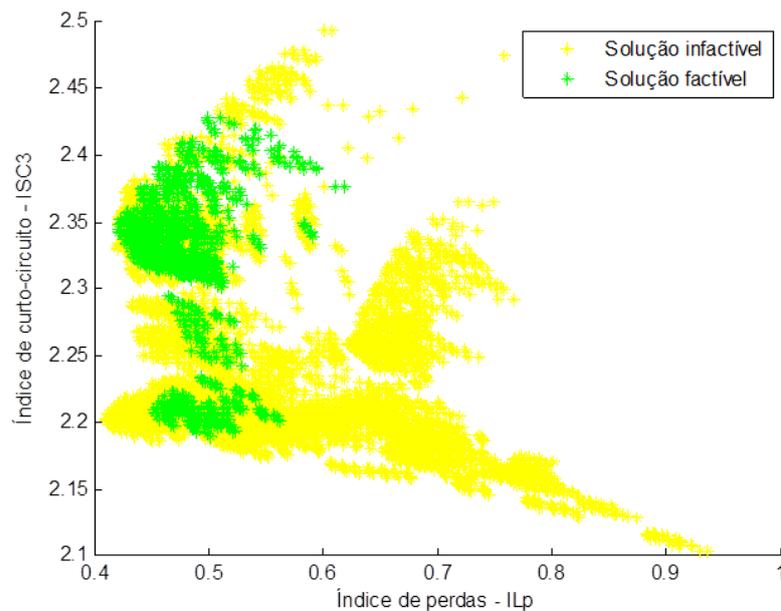
Tabela 3 – Resumo dos dados das redes elétricas, testes e espaço de busca.

Rede elétrica	V_{SE} (pu)	Nós (exceto SE)	Unidades de GD	Espaço de busca
RDMT123	1,0	113	2	12656
RDMT34	1,05	32	2	992

Fonte: Alguns dados adaptados de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a, 2000b).

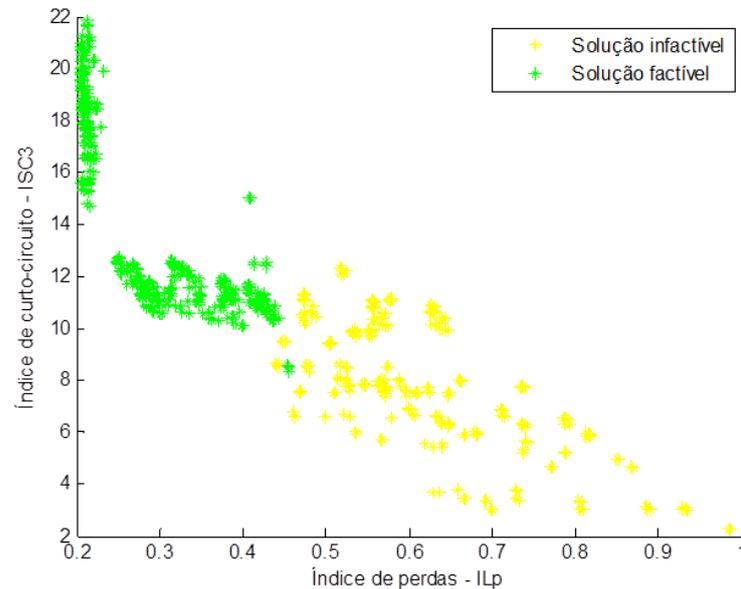
O espaço de busca todo é obtido realizando-se todas as combinações possíveis entre as unidades de GD e os nós das redes elétricas. Isso permite que seja determinada a fronteira de Pareto real para cada caso. Essas combinações estão representadas no espaço das funções objetivo na Figura 13 para a rede RDMT123 e na Figura 14 para rede RDMT34. Nas figuras 13 e 14 estão identificadas as configurações dos geradores na rede que satisfazem as restrições de tensão e corrente da formulação dada pelas equações (17), chamadas de factíveis, e as infactíveis que violam essas restrições. Na Figura 13, por exemplo, está representado o conjunto de todas as 12656 configurações possíveis, das quais 1397 são factíveis.

Figura 13 – Conjunto de todas soluções e subconjunto das soluções factíveis para a rede RDMT123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 14 – Conjunto de todas soluções e subconjunto das soluções factíveis para a rede RDMT34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esta formulação permite que uma concessionária que detém a propriedade das unidades geradoras realize a alocação ótima observando o *tradeoff* entre os critérios definidos (SIANO et al., 2009). Pode ainda representar um cenário de acesso à rede por terceiros em que o estudo serviria de orientação ao operador da rede sobre os impactos da GD e dos nós da rede que apresentem maior benefício ou prejuízo, podendo-se adotar uma política de incentivos.

Mesmo as soluções que violam alguns tipos de restrições do problema podem ser relevantes na análise de *tradeoff* se o ganho em alguma função objetivo justifica o investimento para eliminar a infactibilidade. Isso depende não apenas da restrição violada mas também da extensão da violação. Assim, no sentido de permitir essa análise mais ampla e possibilitando ainda a avaliação do desempenho dos métodos para diferentes fronteiras de Pareto, os testes serão conduzidos também para o problema sem considerar os limites de tensão nas barras e de corrente nos ramos.

5.2.1.1 Variáveis de decisão e codificação

As variáveis de decisão deste modelo são a posição de uma unidade de GD e, implicitamente, a capacidade do gerador dada pela sua potência nominal. Foram propostas duas codificações equivalentes.

Na primeira delas, uma configuração de geradores na rede é definida por meio de um vetor com n elementos, em que cada um deles representa uma das n barras da rede com possibilidade de conexão da GD. As barras sem geradores são identificadas por 0, e aquelas com uma unidade de GD conectada recebem o número que identifica o tipo de gerador, como 1 ou 2. Na Figura 15 é mostrado um exemplo de configuração.

Figura 15 – Exemplo de codificação para o modelo de alocação ótima da GD.

BARRAS →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo a configuração apresentada na Figura 15, foram definidos os tipos de GD 1 e 2, havendo duas unidades de 1 e uma de 2, para uma rede elétrica de 16 barras. A codificação indica que os geradores do tipo 1 foram instalados nas barras 4 e 16. Já o gerador do tipo 2 foi conectado na barra 9.

Uma segunda codificação é utilizada (AHMADI et al., 2008) em que cada configuração é representada por um vetor de dimensão igual ao número de unidades de GD. Em cada posição desse vetor é identificado o nó ao qual o gerador está conectado. Um exemplo dessa codificação aplicada ao indivíduo da Figura 15 é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de codificação alternativa para o modelo de alocação ótima da GD.

GD1	GD1	GD2
4	16	9

Fonte: Adaptada de Ahmadi et al. (2008).

A codificação mostrada na Figura 15 foi utilizada pelo método NSGA-II, enquanto a codificação alternativa da Figura 16 foi usada pelos métodos BTMO e MEPSO.

5.2.2 Modelo para a análise de impacto da Geração Distribuída sobre a capacidade da rede

Nesta seção é proposta uma metodologia baseada em OM para a avaliação do impacto da GD com relação ao alívio de sobrecarga e possibilidade de adiar investimentos em infraestrutura de rede. Assim, como no modelo de alocação ótima, define-se um número fixo de geradores a serem obrigatoriamente conectados. Entretanto, a geração neste modelo não é fixa, permitindo-se ao gerador variar a injeção de potência ativa de um valor mínimo até um máximo. Uma vez definido o nível de geração assume-se que a unidade de GD é capaz de manter a geração firme durante todo o período de demanda de pico.

As restrições são os limites máximo e mínimo estabelecidos para a tensão e para a geração, além das equações de fluxo de potência. Dois objetivos foram estabelecidos referentes ao nível de penetração da GD com relação à demanda da rede e ao nível de congestionamento ou capacidade das linhas.

Função objetivo 1: Nível de penetração da GD (PEN)

O nível de integração da GD foi definido como um atributo através do índice PEN dado pela equação (18). O índice reflete em termos percentuais quanto a potência ativa total gerada representa com relação à soma da demanda e perdas da rede original, sem GD, na condição de demanda investigada.

$$\text{PEN} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{NGD} P_{Gi}}{P_D^0 + P_L^0} \right) \cdot 100 \quad (18)$$

Sendo:

NGD : número de unidades geradoras.

P_{Gi} : potência ativa trifásica produzida pela unidade de GD i ;

P_D^0 : potência ativa total demandada pela rede sem a presença da GD;

P_L^0 : perda ativa total para a rede sem a presença da GD.

Função objetivo 2: Índice de capacidade da rede (IC)

O segundo atributo se refere à capacidade da rede. Como exposto anteriormente, sabe-se que na reconstrução dos sistemas de T&D para se obter uma capacidade mais elevada é um procedimento de alto custo. Por isso representa uma das notáveis oportunidades para a integração da GD: a possibilidade de adiar investimentos no reforço da infraestrutura da rede (SIANO et al., 2009) e (WILLIS, 2004). Adia-se o investimento em infraestrutura quando a GD é capaz de proporcionar melhoria na capacidade da rede, especialmente com suporte de geração durante o pico da demanda. Todavia, a geração pode também causar congestionamento nas linhas. Em vista disso, a possibilidade de adiar investimentos usando a GD é analisada usando o índice IC, definido pela equação (19) (OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2006), o qual indica o impacto sobre a capacidade da rede. O estudo da capacidade é representado neste modelo apenas pelo limite de corrente dos cabos, sem considerar o limite de potência da SE. Os valores positivos de IC representam a capacidade de corrente disponível e os valores negativos fornecem em termos percentuais o quanto a corrente excede o permitido. O valor de IC é obtido para o ramo mais carregado.

$$IC = \left[1 - \max_{k=1, \dots, NR} \left(\frac{I\varphi_k}{I_k^{max}} \right) \right] \cdot 100 \quad (19)$$

Em que:

$I\varphi_k$: magnitude da corrente da fase φ no ramo k ;

I_k^{max} : máxima magnitude de corrente permitida no ramo k ;

NR : número total de ramos na rede.

A formulação do problema é apresentada pelas equações (20).

$$\begin{aligned}
 FO_1 &= \text{PEN} \\
 FO_2 &= \text{IC} \\
 \text{s.a.} \quad & \begin{cases} P_i = \sum_{j \in NC_i} P_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) & i = 1, \dots, NN \\ Q_i = \sum_{j \in NC_i} Q_{ij}(V_i, V_j, \theta_i, \theta_j) \\ 0,95 \cdot V_N \leq V_i^{GD} \leq 1,05 \cdot V_N \\ P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max} & k = 1, \dots, NGD \end{cases} \quad (20)
 \end{aligned}$$

NN : número de nós da rede;

P_i, Q_i : injeção líquida de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra i ;

P_{ij}, Q_{ij} : respectivamente, fluxo de potência ativa e reativa no ramo $i - j$;

V_i, θ_i : magnitude e ângulo da tensão na barra i ;

NC_i : conjunto dos nós vizinhos ao nó i ;

V_N : magnitude da tensão nominal;

V_i^{GD} : tensão na barra i para uma determinada configuração da GD;

P_{Gk} : potência ativa trifásica gerada pelo unidade de GD k ;

P_{Gk}^{\min} : limite mínimo de geração de potência ativa trifásica da unidade de GD k ;

P_{Gk}^{\max} : limite máximo de geração de potência ativa trifásica da unidade de GD k .

Novamente utilizou-se um limite mínimo para a tensão de 0,95 da tensão nominal, diferente de 0,93 da tensão nominal estabelecido por ANEEL (2012).

Quanto à restrição referente à geração da GD, uma opção interessante e próxima da realidade poderia ser a definição dessa restrição em termos do fator de potência unitário ou em torno disso. Todavia, como a principal meta é analisar a capacidade da rede com relação ao nível de penetração da GD, permite-se que a geração varie entre um máximo e um mínimo para identificar características como o nível mínimo necessário para se obter a factibilidade, por exemplo. Assim, os diferentes níveis de geração de potência ativa não correspondem a variações no fator de potência, mas a um nível de geração obtido como se fosse instalada uma unidade de GD com capacidade em torno da geração indicada, com fator de potência unitário e fixo.

Do ponto de vista da OM, o uso de PEN e IC como objetivos é um meio de investigar a relação de conflito entre a integração da GD e a capacidade da rede explicitamente. Dependendo de onde as unidades de GD estão localizadas, o crescimento da injeção de potência ativa inicialmente melhora a capacidade. Contudo, há um limite para a integração da GD além do qual o aumento da geração eleva o congestionamento, afetando negativamente IC. Logo, busca-se maximizar o índice IC pois deseja-se, obviamente, obter ganhos de capacidade através da GD. Já o índice PEN é analisado tanto em minimização quanto em maximização no sentido de definir o comportamento de IC com máxima e mínima penetração da GD. Assim, considerando-se a formulação de maximização de IC e minimização de PEN, como apresentado por Alarcon-Rodriguez et al. (2009), pretende-se obter as condições de máximo benefício na capacidade que pode ser obtido com a mínima penetração da GD, o que corresponde à FP da região em que o aumento da potência ativa injetada promove melhora em IC. Como o índice PEN é minimizado, ocorre então conflito entre os objetivos. Já a formulação de maximização de IC e maximização de PEN possibilita a identificação de configurações das unidades geradoras que favoreçam a máxima penetração da GD com máximo ganho para a capacidade da rede. Desta forma é determinada a FP referente à região em que o aumento da geração eleva o congestionamento em algum trecho da rede, ou seja, reduz IC. Por isso, nessa formulação também há conflito entre os objetivos.

A questão do nível de controle que a concessionária pode exercer sobre o acesso da GD à rede define como a análise da FP e do conjunto ótimo de Pareto pode ser aproveitada no apoio à decisão no processo de planejamento da expansão. Se a concessionária é proprietária dos geradores, ou pretende avaliar esta opção, os resultados podem ser usados diretamente na tomada de decisão, na medida em que estariam identificados as posições e os níveis de geração ótimos para as unidades de GD. No entanto, se a concessionária lida com os impactos da GD que não é de sua propriedade, situação mais comum na realidade, a análise proposta torna-se limitada. Nesse caso, poderia ser relevante para os responsáveis pelo planejamento da expansão obter informação da total extensão do impacto que a GD pode causar no futuro analisado, o que não é uma tarefa trivial. Assim, é proposta uma metodologia de análise do impacto da GD em toda a sua extensão baseando-se na definição das fronteiras de Pareto. Além da maximização de IC com a minimização e maximização de PEN, as fronteiras de Pareto foram definidas também considerando-se a minimização de IC combinada com a minimização e maximização de PEN. Claramente não há interesse técnico na minimização de IC, porém isso mostra as piores condições de impacto sobre a capacidade causadas pela inserção da GD. Explorando a definição que garante a unicidade da FP (CROUSILLAT et al.,

1993), quatro fronteiras de Pareto são então determinadas definindo os limites dentro dos quais os valores dos objetivos estarão. Os testes foram realizados também sem considerar a restrição de tensão para se obter mais informações sobre o impacto negativo da GD.

5.2.2.1 Variáveis de decisão e codificação

As variáveis de decisão neste modelo são a posição da unidade de GD e a potência ativa injetada por ela. A codificação é similar à representada na Figura 16, sendo que a cada gerador referem-se duas posições no vetor de variáveis de decisão: o valor discreto do nó de conexão e o valor real da potência ativa gerada. Na Figura 17 é mostrada uma estrutura geral do vetor de codificação das variáveis de decisão para um conjunto de g geradores. Somente o método MEPSO foi aplicado a este modelo.

Figura 17 – Vetor de codificação das variáveis de decisão para o problema de avaliação de impacto da GD sobre a capacidade da rede.

GD(1)		GD(2)		GD(g)	
Pos ₍₁₎	P _{G(1)}	Pos ₍₂₎	P _{G(2)}	...	Pos _(g) P _{G(g)}

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3 Metodologia para avaliação de desempenho das meta-heurísticas de OM

Há um considerável número de métricas propostas na literatura para quantificar o desempenho das meta-heurísticas de OM, permitindo que se analise a capacidade de um método de convergir para a FP real mantendo um conjunto diversificado de pontos (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Neste trabalho foram utilizados três índices de desempenho. Com a métrica *Error Ratio* (ER) (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007) indica-se o número de soluções na FP calculada (FP_{calc}) que não são membros da FP real (FP_{real}) com relação à cardinalidade do conjunto FP_{calc}, como definido pela equação (21).

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^{|\text{FP}_{\text{calc}}|} e_i}{|\text{FP}_{\text{calc}}|} \quad (21)$$

A variável e_i é nula se a i -ésima solução de FP_{calc} pertence a FP_{real} e é igual a 1 caso contrário. Assim, ER pode assumir valores entre zero e um, em que zero indica a melhor situação de convergência com todos os pontos de FP_{calc} pertencendo a FP_{real} . O ER unitário representa o pior cenário em que nenhuma solução de FP_{real} foi determinada. Embora a métrica ER seja um indicador da eficiência de um método em produzir uma solução próxima da FP_{real} , este índice isoladamente não é suficiente para uma conclusão definitiva sobre o desempenho de um método, afinal uma FP_{calc} pode ter um pequeno número de pontos pouco distribuídos e mesmo assim apresentar ER nulo. Apresenta-se então uma outra métrica que indique o quanto da FP real foi encontrado. A métrica Percentual da Fonteira de Pareto (PFP), definida pela equação (22), expressa o percentual da FP real obtida por FP_{calc} .

$$PFP = \frac{|FP_{\text{calc}} \cap FP_{\text{real}}|}{|FP_{\text{real}}|} \times 100 \quad (22)$$

Uma terceira métrica é definida pela equação (23). A métrica Δ (DEB et al., 2002) permite mensurar o quanto é uniforme o espalhamento dos pontos de FP obtida e a distância dos extremos de FP_{calc} aos extremos de FP_{real} .

$$\Delta = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (23)$$

Em que:

- d_f : distância euclidiana entre o primeiro ponto extremo em FP_{real} ao primeiro ponto extremo em FP_{calc} ;
- d_l : distância euclidiana entre o segundo ponto extremo em FP_{real} ao segundo ponto extremo em FP_{calc} ;
- d_i : distância euclidiana entre dois pontos consecutivos;
- \bar{d} : média aritmética entre todas as distâncias d_i ;
- N : cardinalidade do conjunto FP_{calc} .

A métrica Δ é nula se os pontos de FP_{calc} são uniformemente distribuídos e se foram obtidos os pontos extremos de FP_{real} . Se os N pontos são iguais, a métrica tem valor unitário,

contudo esta não é a pior situação, visto que Δ pode ser maior que 1 em cenários com grande variância em d_i (DEB et al., 2002).

Para calcular os valores de ER e PFP, a FP real deve ser conhecida, ao passo que para a métrica Δ são necessárias apenas as soluções extremas de FP_{real} para se determinar d_f e d_l . Assim, para os casos em que a FP é um conjunto infinito, a métrica Δ é de grande utilidade posto que a FP estará tanto mais bem caracterizada quanto mais uniformemente dispersos estiverem os pontos da FP obtida. Já a análise das métricas ER e PFP pode, no caso de uma FP infinita, conduzir a conclusões incorretas.

Contudo, para os casos em que a FP é um conjunto finito, os resultados de ER e PFP juntos permitem observar com segurança a característica de convergência de um método. Nesses casos são os resultados da métrica Δ que não oferecem condições confiáveis para avaliar a capacidade de espalhamento de um método: os pontos que pertencem a uma FP têm uma disposição não necessariamente uniforme com um valor de Δ associado, que depende então da convergência. Assim, como a convergência pode influenciar a uniformidade do espalhamento, este aspecto não pode ser julgado entre soluções obtidas por métodos distintos unicamente pela comparação de seus valores de Δ .

Pelas equações (17) é definido um problema em que a FP é um conjunto finito, fazendo com que as métricas ER e PFP sejam as mais representativas na comparação de desempenho entre os métodos. A métrica Δ tem então um papel secundário devido às suas limitações para este tipo de FP. O tamanho do problema, tanto para a rede RDMT34 quanto para a RDMT123, permite a definição de todas as soluções do espaço de busca e, portanto, da FP real.

As métricas são em geral avaliadas para um conjunto de execuções dos algoritmos, como um meio de minimizar a influência das variáveis aleatórias dos métodos na análise dos resultados. Deb et al. (2002), além das análises gráficas, apresentaram a média e a variância das métricas utilizadas depois de 10 execuções do algoritmo. Metodologia semelhante foi empregada em (LI, 2003), também com 10 execuções dos algoritmos. Já Sun et al. (2008) e Tan, Lee e Khor (2001) apresentaram os resultados em diagramas de caixa após 30 execuções dos algoritmos. Neste trabalho, foram realizadas 10 execuções dos algoritmos e os resultados organizados e discutidos por meio de diagramas de caixa.

5.4 Ferramentas computacionais de cálculos elétricos

Duas rotinas de cálculo das grandezas elétricas da rede foram implementadas: uma para realizar os cálculos de fluxo de potência e outra para a determinação das correntes de curto-circuito.

O cálculo de fluxo de potência foi realizado com base no método de varredura apresentado por Cheng e Shirmohammadi (1995). Foram feitas as seguintes considerações: uma modelagem da rede a três fios, com os efeitos do cabo neutro agregados por redução de Kron; as barras de geração sendo definidas como do tipo PQ, ou seja, como “cargas negativas”. Uma vez determinado o estado da rede, calculam-se as perdas ativas nas linhas por fase, somando-as ao final para obter a perda ativa trifásica da rede. O algoritmo de cálculo de fluxo de potência não apresentou problema de convergência ou perda de desempenho com a existência dos fluxos de potência reversos.

Os valores das correntes de curto-circuito trifásico foram obtidos pela formulação matricial apresentada por Elgerd (1976) que utiliza componentes simétricas. Um dos passos dessa rotina que é mais oneroso em termos computacionais é o cálculo das matrizes impedância de sequência por meio da inversão das matrizes admitância de sequência positiva, negativa e zero. Uma melhora significativa no desempenho desse processo foi alcançada considerando-se a característica de esparsidade das matrizes admitância através da técnica descrita por Zollenkopf (1971). Os valores das impedâncias de sequência zero, positiva e negativa do sistema e dos geradores foram obtidos de Ochoa, Padilha-Feltrin e Harrison (2006): $Z_{sist(0)} = j10,7 \Omega$, $Z_{sist(+)} = 2,9 + j2,7 \Omega$, e $Z_{sist(-)} = Z_{sist(+)}$ para o sistema; e $Z_{ger(0)} = j1,6758 \Omega$, $Z_{ger(+)} = j6,2972 \Omega$, e $Z_{ger(-)} = j3,7837 \Omega$ para as unidades geradoras.

6 Testes e resultados

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões sobre o desempenho dos métodos de OM expostos nos capítulos 3 e 4 e as análises suportadas pela metodologia e modelos propostos no Capítulo 5. São fornecidas ainda informações importantes para o entendimento dos resultados, principalmente a caracterização das redes de distribuição radiais utilizadas.

6.1 Detalhes adicionais de implementação e considerações para os testes

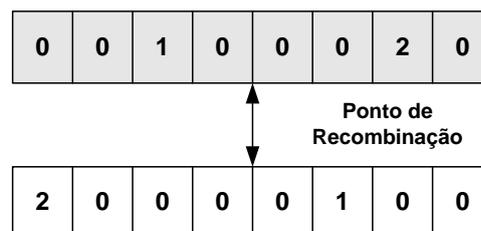
6.1.1 Operadores genéticos do método NSGA-II

Estão descritos a seguir os operadores genéticos de seleção, recombinação e mutação utilizados no método NSGA-II.

Utilizou-se a seleção por torneio baseada no *Crowded Comparison Operator*, que viabiliza a comparação de indivíduos no contexto da OM. A cada operação de seleção realiza-se uma quantidade de jogos igual ao tamanho da população, nos quais duas configurações são tomadas de forma aleatória. Aquela que possuir a melhor função objetivo participa da geração de um descendente pelo processo de recombinação.

De posse das configurações que devem gerar descendentes, o operador de recombinação é aplicado a duas delas por vez, gerando duas configurações para compor a nova população. Utilizou-se a recombinação simples em que segmentos dos cromossomos são permutados a partir de um ponto escolhido aleatoriamente, como ilustrado na Figura 18 e na Figura 19.

Figura 18 – Configurações antes do processo de recombinação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 19 – Configurações descendentes pela operação de recombinação.

0	0	1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	2	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Pela Figura 19 nota-se que o processo de recombinação pode produzir configurações infactíveis, pois cada cromossomo deve ter obrigatoriamente um número definido de geradores de cada tipo. Desse modo, foi adotado um procedimento após a recombinação para eliminar esse tipo de infactibilidade mencionada de cada configuração descendente.

Por fim, o operador de mutação foi definido de maneira a não produzir soluções inconsistentes quanto à quantidade dos geradores de cada tipo: a taxa de mutação é verificada e um dos geradores é escolhido de forma aleatória e transferido para a posição subsequente do vetor de codificação, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Exemplo de processo de mutação.

2	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os operadores de recombinação e de mutação têm taxas definidas que indicam a probabilidade de serem aplicados.

6.1.2 Tratamento de infactibilidades

Neste trabalho utilizou-se uma técnica tradicional para o tratamento de algumas infactibilidades, como as decorrentes das violações dos limites estabelecidos de tensão e corrente, que consiste em penalizar a função de adaptação com um fator constante. Se o fator for adequadamente definido, assegura-se que as soluções infactíveis sejam dominadas pelas factíveis, não afetando a comparação entre as soluções factíveis. Embora simples, essa técnica apresenta o inconveniente de adicionar a necessidade de definir um fator de penalização para

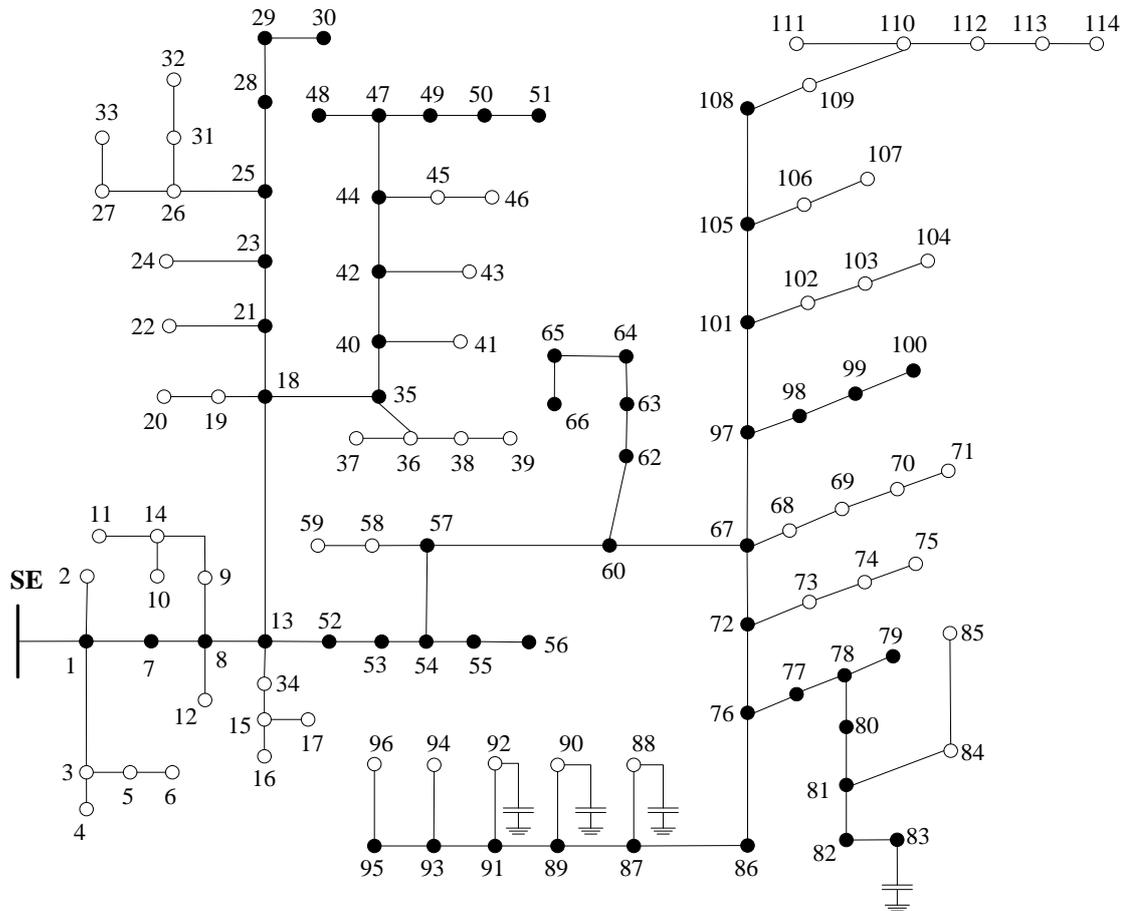
cada função de adaptação. No sentido de evitar esse fato indesejável, há metodologias de tratamento das infactibilidades como a proposta por Deb et al. (2002), que modifica o conceito de dominância, acrescentando um elemento baseado na factibilidade da solução. Isso evita o acréscimo de parâmetros ajustáveis e introduz mais sensibilidade na distinção das soluções infactíveis, o que pode ser benéfico para a convergência.

6.1.3 *Redes teste*

Os testes foram executados, como mencionado no Capítulo 5, para duas redes elétricas com características distintas: a rede de distribuição de média tensão 34 (RDMT34) e a rede de distribuição de média tensão 123 (RDMT123) adaptadas, respectivamente, a partir dos alimentadores IEEE-34 e IEEE-123 (KERSTING, 2001).

A rede IEEE-123 (IEEE PES DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE, 2000b) é urbana com predominância de linhas aéreas, mas com a ocorrência de um trecho subterrâneo entre os nós 60 e 66. Os comprimentos das linhas são em média de 100 m sendo o máximo de 251 m observado entre os nós 13 e 18. A tensão nominal de linha é 4,16 kV. Há trechos com configurações monofásicas, bifásicas e trifásicas, quatro capacitores *shunt* instalados nas barras 83, 88, 90 e 92 e várias possibilidades de configuração de circuito dependendo de como forem operadas as chaves. Para este trabalho manteve-se uma única configuração para a rede, correspondente à definida no conjunto de dados original. Algumas adaptações foram realizadas como a retirada dos reguladores de tensão, de um transformador entre as barras 61 e 610 e de algumas barras resultando num conjunto final de 114 nós e 113 ramos identificado por RDMT123. A rede RDMT123 é apresentada na Figura 21.

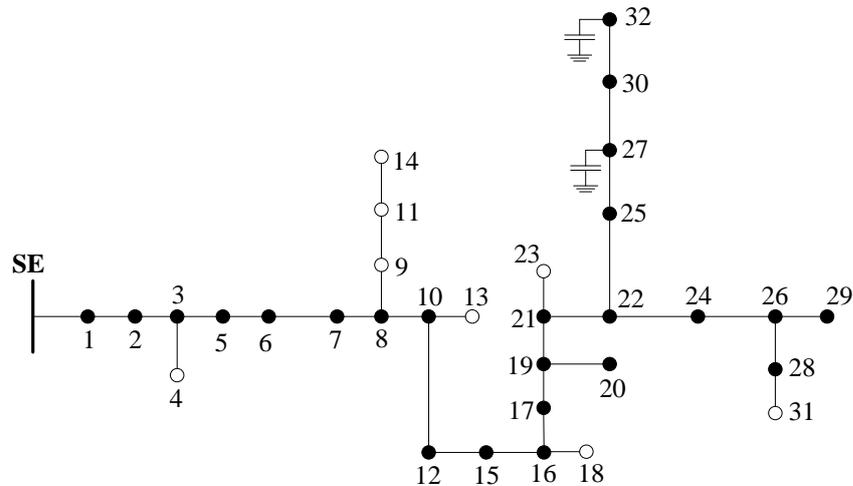
Figura 21 – Rede elétrica RDMT123, adaptada de IEEE-123.



Fonte: Adaptada de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000b).

A rede IEEE-34 (IEEE PES DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE, 2000a) é rural com um alimentador longo, carregamento leve e composto totalmente por linhas aéreas. A tensão nominal de linha é 24,9 kV. Os comprimentos das linhas variam desde centenas de metros até dezenas de quilômetros, com o máximo de aproximadamente 14,5 km entre os nós 9 e 11 e sendo verificada uma distância de 29 km entre os nós 2 e 6. Há diversos arranjos de fase trifásicos e monofásicos. Mais uma vez a principal adaptação da rede foi a exclusão dos reguladores de tensão e de um transformador entre os nós 832 e 888 ficando a rede com um total de 33 nós e 32 ramos, sendo identificada então por RDMT34. A rede RDMT34 é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Rede elétrica RDMT34, adaptada de IEEE-34.



Fonte: Adaptada de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a).

Quanto às cargas, a rede IEEE-123 é caracterizada pelo alto carregamento enquanto a IEEE-34 apresenta nível de carregamento menor. Na rede IEEE-34 há a ocorrência de cargas distribuídas, cuja modelagem para a rede RDMT34 se deu com a divisão em partes iguais da carga distribuída de uma linha entre os seus nós de origem e destino. Na rede IEEE-123 todas as cargas são representadas concentradas nas barras, não havendo a presença de cargas distribuídas, sendo seus valores e localizações mantidos em RDMT123. Em ambas as redes a carga total é desequilibrada, sendo essa característica mais notável na rede RDMT123, como mostrado na Tabela 4.

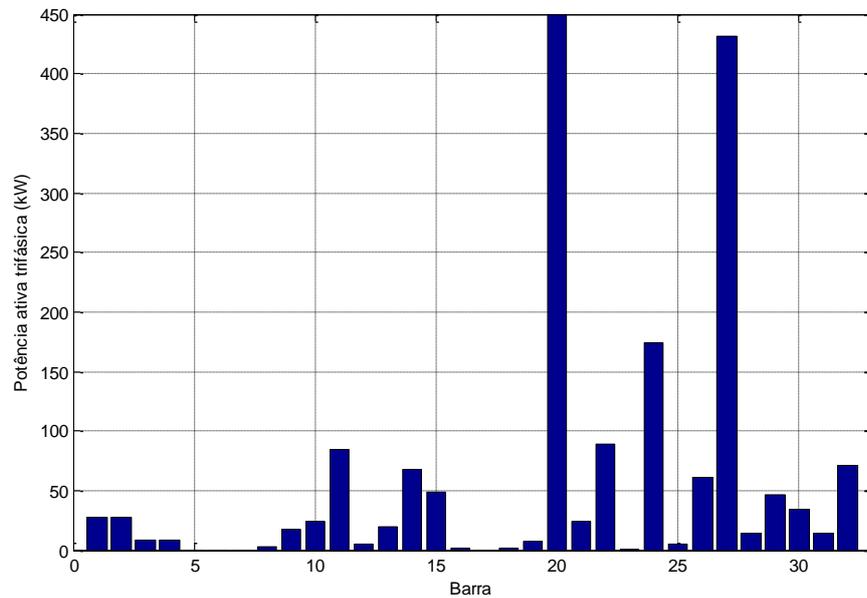
Tabela 4 – Carga total por fase para as redes elétricas RDMT34 e RDMT123.

Rede	Fase A		Fase B		Fase C	
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
RDMT123	1420	775	915	515	1155	635
RDMT34	604	356	586	345	579	343

Fonte: Dados adaptados de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a, 2000b).

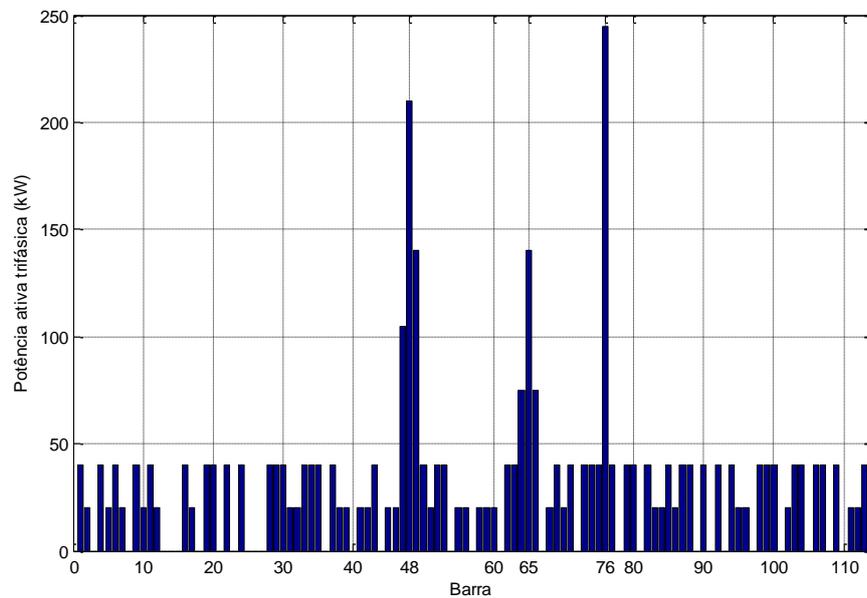
A disposição espacial das cargas é apresentada através da potência ativa trifásica na Figura 23 para a rede RDMT34 e na Figura 24 para rede RDMT123.

Figura 23 – Potência ativa trifásica para cada barra da rede RDMT34.



Fonte: Dados adaptados de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a).

Figura 24 – Potência ativa trifásica para cada barra da rede RDMT123.

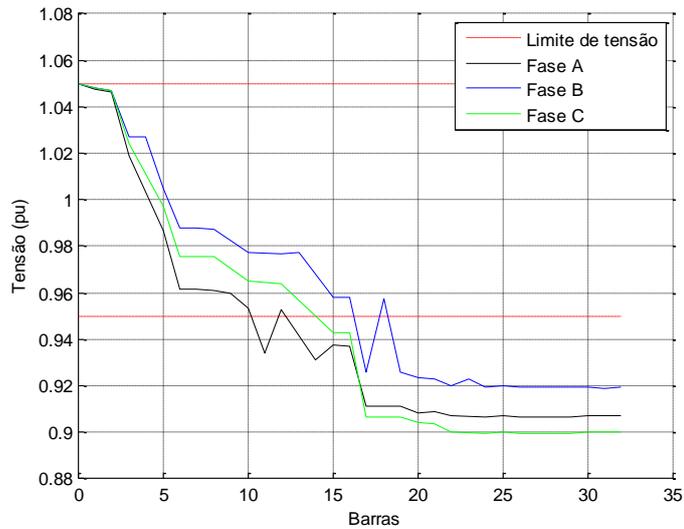


Fonte: Dados adaptados de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000b).

Finalmente, as redes elétricas RDMT34 e RDMT123 têm configuração radial e os modelos das cargas foram considerados todos como de potência constante e ligadas em Y. Os

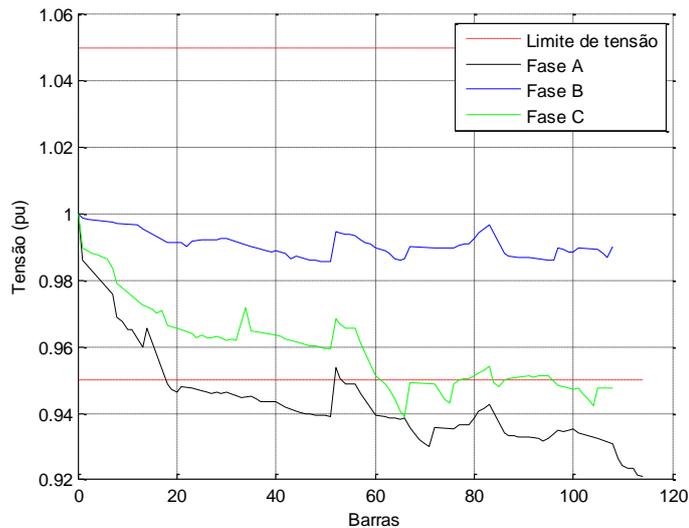
dados de cada rede estão apresentados nos Anexos. Considerou-se uma condição no horizonte de planejamento em que o crescimento da demanda coincidisse, na condição de pico, com os valores nominais das cargas, o que resulta numa rede elétrica inadequada do ponto de vista da tensão para ambas, como mostrado na Figura 25 e na Figura 26, e da corrente para a rede RDMT123.

Figura 25 – Perfil de tensão da rede RDMT34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 26 – Perfil de tensão da rede RDMT123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 5 são exibidos os ramos da rede RDMT123 em que a corrente supera o máximo permitido nos cabos e o nível dessa sobrecarga.

Tabela 5 – Ramos da rede RDMT123 com sobrecarga.

Linha	I/Imax (%)		
	Fase A	Fase B	Fase C
SE-1	26,7	-	0,5
1-7	23,1	-	-
7-8	21,3	-	-
8-13	12,3	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.2 Análise dos métodos de Otimização Multiobjetivo

A análise dos métodos de OM compreende um conjunto de testes realizados unicamente para o método MEPSO e outro para a comparação de desempenho entre os métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO. Utilizam-se nos testes as redes de distribuição RDMT34 e RDMT123 para o problema com e sem as restrições de tensão e corrente nas linhas, de forma a observar o desempenho dos métodos para diferentes fronteiras de Pareto. O problema com o conjunto completo de restrições é indicado por CONS enquanto o problema sem as restrições mencionadas é identificado por UNCONS, ambos seguidos pelos números 34 ou 123 em referência à rede elétrica. A cardinalidade e o valor da métrica Δ referentes às fronteiras de Pareto reais de cada problema são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de cardinalidade e da métrica Δ associados à FP para todos os casos.

	RDMT123		RDMT34	
	CONS	UNCONS	CONS	UNCONS
$ \mathbf{FP}_{\text{real}} $	29	91	52	76
Δ	1,0514	0,9542	1,3298	1,2650

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados são apresentados para cada um dos casos seguindo uma ordem crescente de cardinalidade do conjunto de pontos da FP, a saber: CONS123, CONS34, UNCONS34 e UNCONS123.

Quanto à avaliação do desempenho dos métodos, considera-se não apenas para uma única execução dos algoritmos mas para um conjunto de dez experimentos. Esses experimentos são definidos por meio de diferentes valores fixos de sementes (de 12340 a 12349) para o gerador de números aleatórios, fazendo com que possam ser repetidos e constituam uma mesma condição de teste para os três métodos. Para a solução obtida em cada experimento são calculados, então, o valor das métricas PFP e ER, definidas na Seção 5.4. O conjunto dos valores das métricas obtido para uma determinada condição ou método são apresentados por meio de diagramas de caixa. Esta ferramenta gráfica de estatística descritiva fornece como medida de tendência central a mediana e ainda uma noção do quanto as soluções estão dispersas ao indicar os valores mínimo, máximo, do primeiro e terceiro quartis.

Acerca da métrica Δ , ela foi definida por permitir que se analise uma característica crucial para uma meta-heurística de OM que é a capacidade de obter a FP com um conjunto de pontos simetricamente espalhados. Contudo, os resultados da métrica Δ não foram apresentados nos testes a seguir por serem inconclusivos para o problema proposto. As fronteiras de Pareto reais para os quatro casos possuem um número finito de pontos assimetricamente espalhados, como consta na Tabela 6. Assim, a simples comparação entre os valores da métrica Δ não permite concluir sobre as características de espalhamento de um método, visto que são influenciados pela convergência.

Em suma, os resultados serão apresentados e discutidos primeiramente para o método MEPSO seguindo-se a comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO.

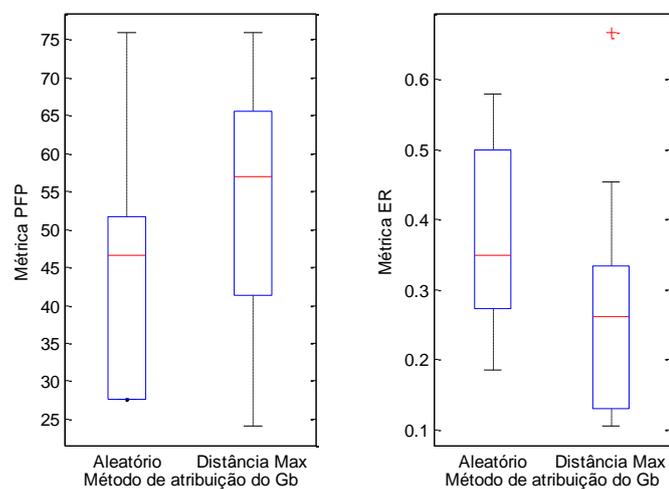
6.2.1 Testes relativos ao método MEPSO

Sendo o método MEPSO uma proposta desenvolvida no âmbito desta tese, alguns dos seus procedimentos e definições de parâmetros podem ser tema de investigação. Nesse sentido, os testes desta seção permitem discutir o comportamento do método com relação a dois aspectos de sua implementação. No primeiro deles, procura-se comparar os dois algoritmos propostos para a atribuição do vetor \mathbf{Gb} , etapa com relevante influência sobre o desempenho do método. O segundo aspecto a ser analisado é a definição da probabilidade de comunicação do \mathbf{Gb} , visto que a definição deste parâmetro tem evidente impacto sobre o desempenho do método EPSO (MIRANDA; KEKO; DUQUE, 2008).

6.2.1.1 Comparação entre metodologias de atribuição do vetor G_b

Duas metodologias foram propostas para a atribuição do vetor G_b no método MEPSO. Ambas consistem em atribuir as posições visitadas por partículas de uma fronteira ($f - 1$) como G_b às partículas da fronteira f , exceto para $f = 1$ em que o melhor global é obtido da Lista de Pareto (LP). Contudo, numa das metodologias essa atribuição é feita de forma aleatória e na outra usando um critério de máxima distância. Os resultados comparando essas duas abordagens é apresentado nas figuras 27 a 30.

Figura 27 – Avaliação das metodologias de atribuição do G_b para o caso CONS123.



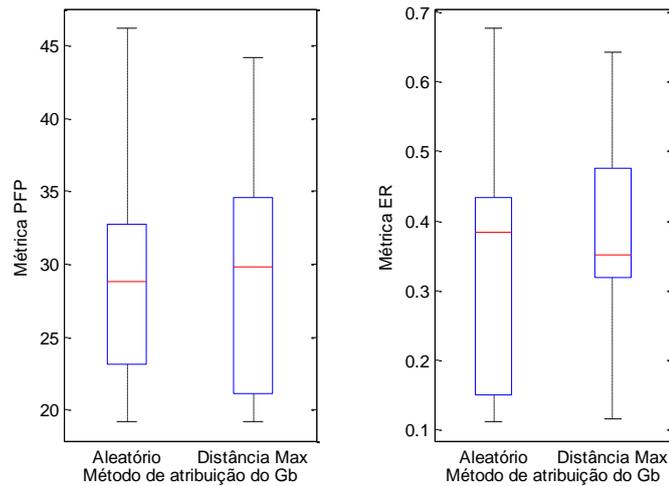
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na Figura 27 que a metodologia baseada no critério de máxima distância (MD) apresenta desempenho, de maneira geral, superior à atribuição aleatória (AL), como indicado pelo valor das medianas e pela localização das caixas, tanto para PFP quanto para ER. Entretanto, os dois conjuntos de dados apresentam dispersão elevada, com notável diferença entre os valores máximo e mínimo obtidos para PFP e distâncias interquartílicas. Além disso, o deslocamento das caixas para os extremos demonstra uma distribuição assimétrica neste caso, notavelmente para valores inferiores da métrica PFP em AL e da métrica ER para MD.

No caso CONS34 apresentado na Figura 28 as abordagens MD e AL mostram desempenho similar com dispersão ligeiramente maior para PFP utilizando MD. Com relação à métrica ER, o método de atribuição aleatória demonstrou elevada dispersão. Ambas as

metodologias obtiveram ainda valores elevados desta métrica, com máximos de aproximadamente 0,7, ou seja, 70% das soluções determinadas não pertencem ao conjunto FP_{real} . Conjuntos de soluções ótimas com essa característica apresentaram exploração ineficiente de determinadas regiões do espaço de busca.

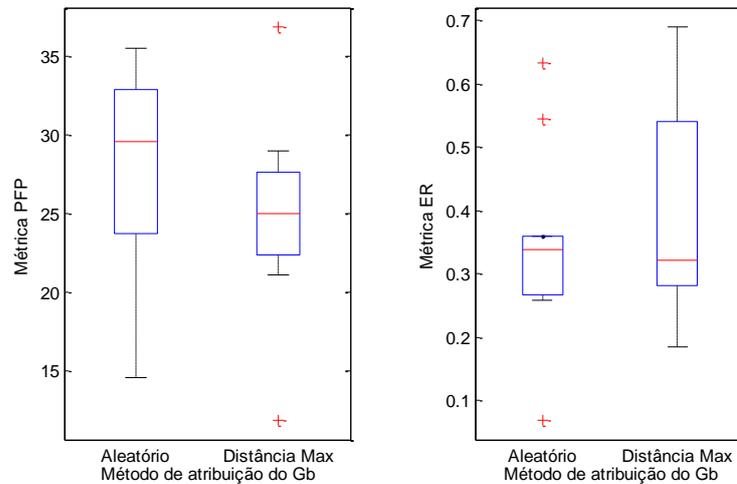
Figura 28 – Avaliação das metodologias de atribuição do **Gb** para o caso CONS34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

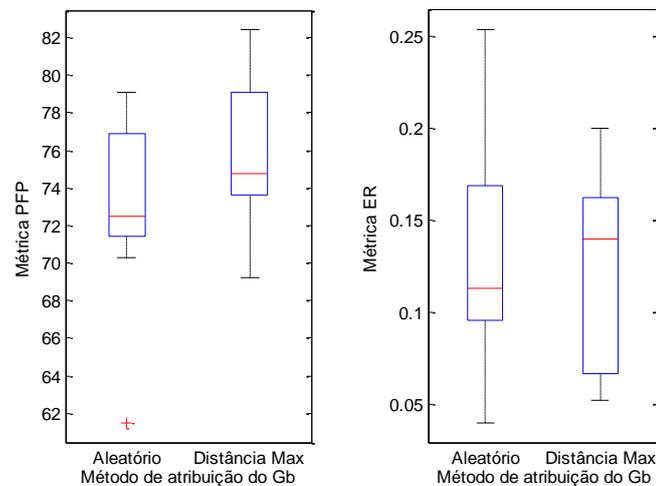
Na Figura 29, a metodologia AL alcançou métrica PFP maior que aproximadamente 25 em 75% dos testes para o caso UNCONS34, embora com distribuição mais dispersa e assimétrica. Já para DM a métrica PFP apresentou comportamento simétrico em torno da mediana (PFP = 25), apesar de duas soluções discrepantes. Quanto à métrica ER, desprezando-se os valores discrepantes, a abordagem AL mostrou-se mais eficiente na exploração das regiões visitadas.

Figura 29 – Avaliação das metodologias de atribuição do **Gb** para o caso UNCONS34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 30 – Avaliação das metodologias de atribuição do **Gb** para o caso UNCONS123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Finalmente, para o caso UNCONS123, mostrado na Figura 30, as metodologias mostram desempenhos novamente similares, com ligeira tendência de DM para os valores maiores de PFP. Apesar da considerável dispersão dos valores de ER, nota-se que variam numa amplitude menor que nos casos anteriores.

Em suma, pode-se afirmar que em termos gerais as metodologias de atribuição do **Gb** propostas apresentam desempenho semelhante, não sendo possível estabelecer ainda relação entre os resultados obtidos e o tamanho do problema ou características da FP. Cabe ressaltar

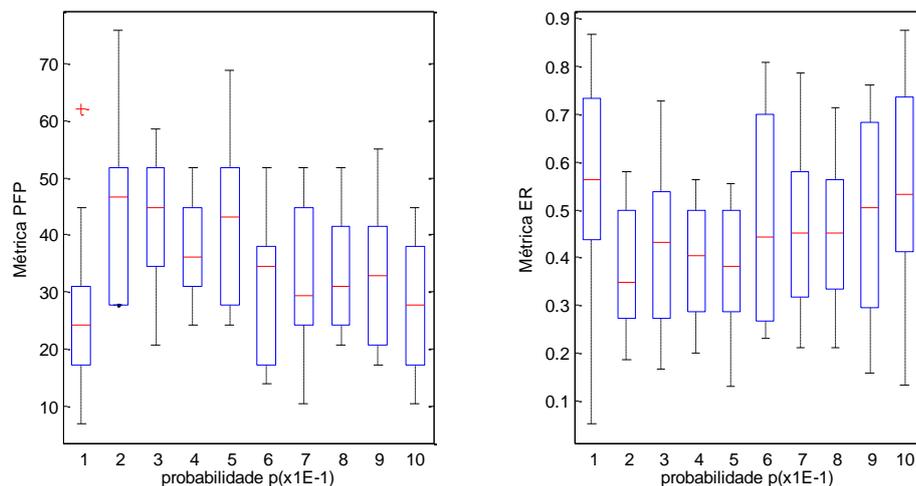
também aspectos relacionados à implementação desses algoritmos: a atribuição aleatória é mais simples e compreende menor esforço computacional. Portanto, para os testes optou-se pela atribuição aleatória do **Gb**.

6.2.1.2 Definição da probabilidade de comunicação do Gb

No método EPSO todas as partículas do enxame estão conectadas segundo a topologia chamada *star communication* ou *star network* (REYES-SIERRA; COELLO, 2006) em que a posição de uma única partícula, com a melhor solução obtida até o momento, é atribuída como **Gb** a todas as outras para orientar o movimento delas. Miranda, Keko e Duque (2008) demonstram que o desempenho do método pode ser consideravelmente melhorado se a comunicação da posição da partícula líder às demais ocorrer de forma estocástica segundo uma probabilidade p . O valor de p pode ser otimizado e apresenta, no caso do EPSO, relação com as características do problema sob análise.

Logo, pretende-se com os testes a seguir investigar o desempenho do método MEPSO segundo valores de p entre 0,1 e 1,0.

Figura 31 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do **Gb** para caso CONS123.

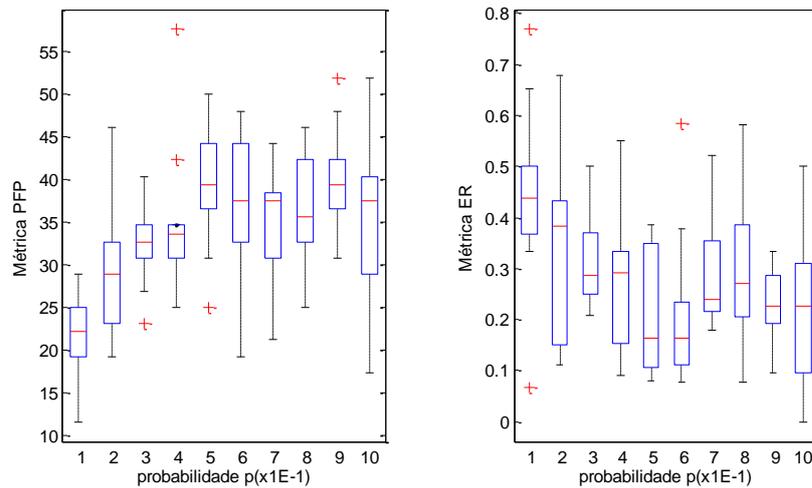


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 31 pode-se salientar o desempenho do método para p igual a 0,2; 0,3 e a 0,5 para a métrica PFP apesar da dispersão. Quanto à métrica ER destacam-se os valores de p entre 0,2 e 0,5. Os valores 0,1 e de 0,6 a 1,0, todavia, apresentaram menores valores da

mediana da métrica PFP, medidas elevadas de ER e considerável distância interquartílica em ER, como para $p = 0,6$.

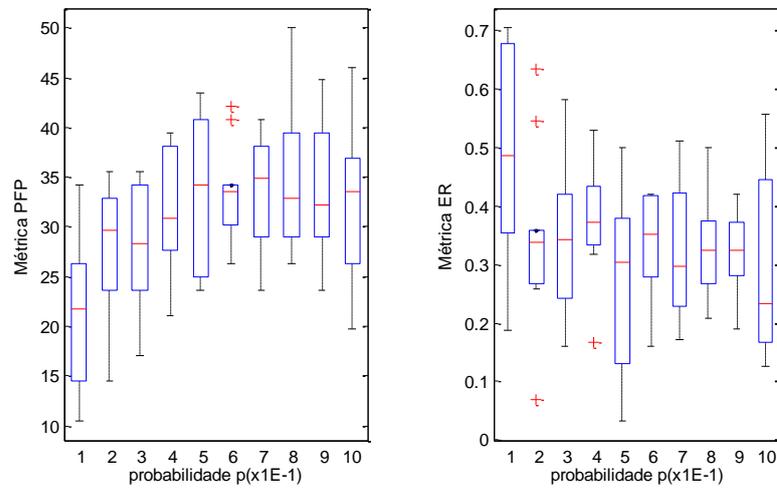
Figura 32 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do **Gb** para caso CONS34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No caso CONS34, mostrado na Figura 32, os valores 0,5; 0,6 e 0,9 para p apresentam desempenho relevante tanto para a métrica PFP quanto para a ER. Por outro lado, os valores da métrica PFP estão concentrados abaixo de 35 para p entre 0,1 e 0,4. Adicionalmente, nesta faixa de valores de p a métrica ER está mais deslocada para valores mais elevados com relação aos outros.

Figura 33 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do **Gb** para caso UNCONS34.

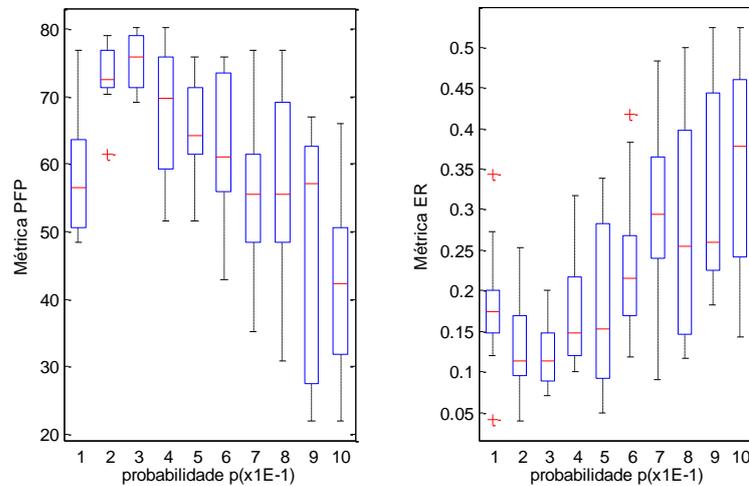


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O desempenho verificado na Figura 33, referente ao caso UNCONS34, é semelhante ao do caso CONS34, com valores de p entre 0,5 e 0,9 apresentando comportamento homogêneo e destacado em termos da métrica PFP. Os resultados para a métrica ER não mostram variação acentuada considerando os valores de tendência central para p entre 0,2 e 0,9, com variações em termos de dispersão e simetria.

No caso UNCONS123, enfim, demonstra-se o bom desempenho obtido pelo método MEPSO para valores de p entre 0,2 e 0,5, com destaque para 0,2 e 0,3, como pode ser visto na Figura 34. Os valores da métrica ER neste caso seguem uma tendência inversa de PFP, o que é esperado dado o alto índice de obtenção de pontos da FP para probabilidades menores, o que significa elevada capacidade de exploração das regiões visitadas no espaço de busca.

Figura 34 – Desempenho do método MEPSO segundo os valores da probabilidade de comunicação do **Gb** para caso UNCONS123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir deste conjunto de testes de desempenho considerando distintos valores de p pode-se confirmar que, assim como para o EPSO, o parâmetro probabilidade de comunicação do **Gb** exerce influência importante sobre o comportamento do MEPSO. Entretanto, pelo menos para os casos investigados, a variação de p tem efeito mais discreto que o verificado em EPSO para alguns problemas, o que pode estar relacionado ao fato da topologia de comunicação do MEPSO não ser a *star network*. Pode-se observar ainda padrões nos resultados como o desempenho geralmente inferior para os valores de p extremos 0,1 e 1,0. Há também dependência do valor de p com a característica do problema: para os casos da rede RDMT34 os valores de p abaixo de 0,5 são menos adequados, sendo esse aspecto revertido para a rede RDMT123, especialmente para o caso UNCONS123. Nesse sentido, a probabilidade $p = 0,5$ pode ser mencionada como um valor que obteve um desempenho constante e de alto nível nos quatro casos, sendo, portanto, aquele definido para o método MEPSO nos testes que seguem.

6.2.2 Estudo comparativo entre os métodos

Nesta seção os métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO são comparados. Os parâmetros dos três métodos a serem definidos pelo usuário podem ser determinados de forma otimizada segundo características do problema. Nos testes a seguir, alguns parâmetros foram fixados e

outros variados conforme a dimensão do espaço de busca, no sentido de obter melhor desempenho. Os parâmetros definidos para cada método estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros definidos para os métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO.

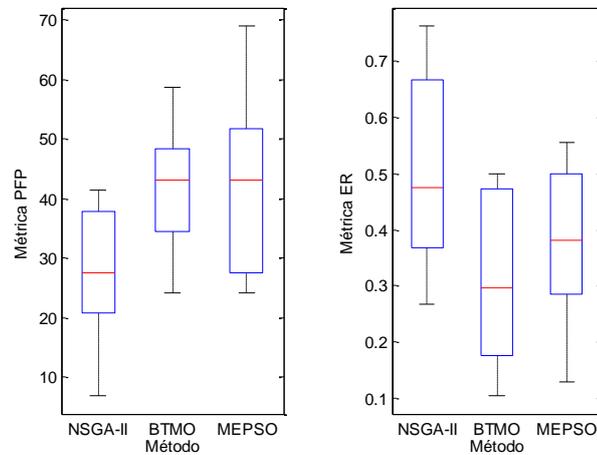
Método	Parâmetro	RDMT34	RDMT123
NSGA-II	Tamanho da população	80	250
	Taxa de recombinação	0,7	0,7
	Taxa de mutação	0,05	0,05
	Tamanho do torneio	2	2
BTMO	Tamanho da vizinhança	20	200
	$step_i^{(1)}$	18	60
	Tamanho da Lista Tabu	10	10
MEPSO	Tamanho do enxame	20	50
	Probabilidade de comunicação p	0,5	0,5
	Tamanho da <i>Lista Gb</i>	5	5
	Parâmetro de aprendizado σ	0,2	0,2

(1) $step_i$ é um parâmetro de passo aplicado às variáveis inteiras durante a geração da vizinhança.
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Foi definido como critério de parada para os três métodos o número de avaliações das funções objetivo: 5000 para RDMT123 e 400 para RDMT34. Esses valores correspondem a aproximadamente 40% do total de combinações em cada espaço de busca, como apresentado na Tabela 3.

Na Figura 35 os resultados de cada método são apresentados para o caso CONS123. Nota-se que os métodos BTMO e MEPSO apresentam aproximadamente o mesmo valor para a mediana, considerando a métrica PFP. MEPSO ainda obteve máximo maior que BTMO, mas um conjunto de valores mais disperso e distribuição assimétrica no sentido de diminuição de PFP. O método NSGA-II mostra um conjunto de PFP concentrado num nível inferior aos outros dois métodos, além de valores mais elevados para a métrica ER.

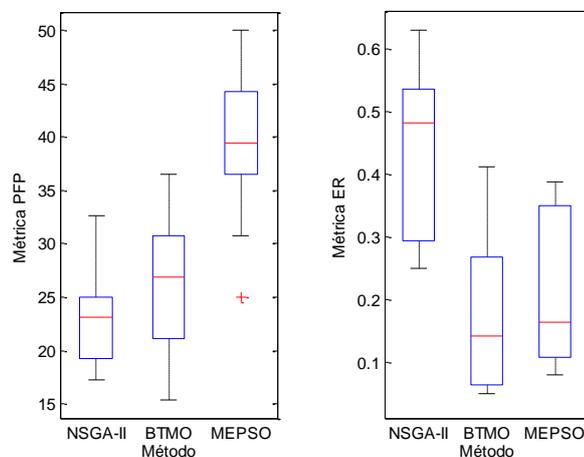
Figura 35 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso CONS123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

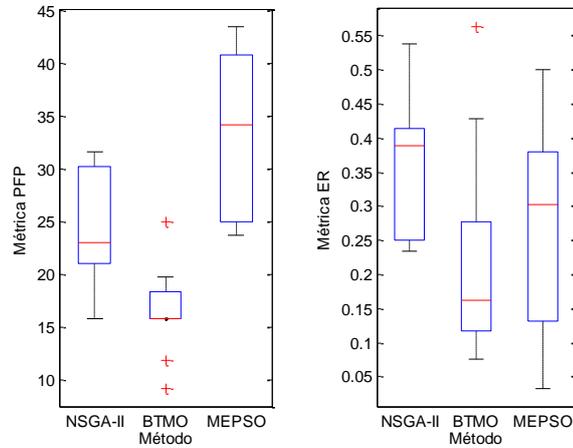
Com relação ao caso CONS34, cujos resultados estão representados na Figura 36, destaca-se o desempenho do método MEPSO com mediana de PFP em torno de 40 e com 50% das soluções entre 40 e 50. Para o método BTMO as soluções de PFP concentram-se entre 20 e 30, não passando dos 37,5, e para NSGA-II 75% dos valores de PFP são inferiores a 25. Quanto à métrica ER, NSGA-II obteve os valores mais elevados enquanto BTMO e MEPSO apresentaram desempenhos semelhantes, com tendência de BTMO a ER mais baixo.

Figura 36 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso CONS34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

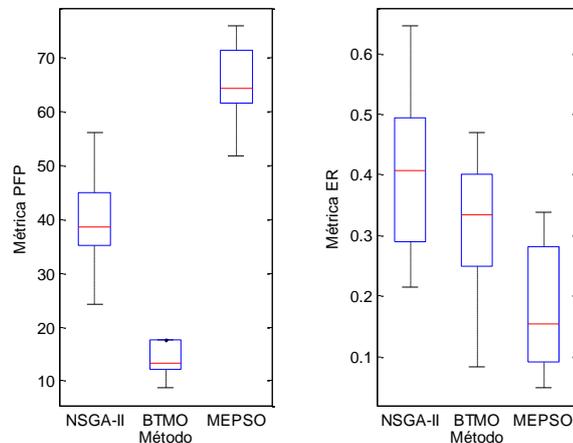
Figura 37 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como observado para o caso CONS34, o método MEPSO para UNCONS34 apresenta desempenho de destaque para a métrica PFP, como pode ser visto na Figura 37. Já o método NSGA-II tem valores de PFP concentrados entre 20 e 30 aproximadamente e BTMO demonstra baixa taxa de determinação de pontos da FP_{real} , com PFP entre 15 e 20. Avaliando a métrica ER, porém, BTMO obteve desempenho de interesse com 50% das soluções apresentando métrica menor que 0,15. O método NSGA-II mais uma vez obteve o conjunto com valores de ER mais elevados.

Figura 38 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

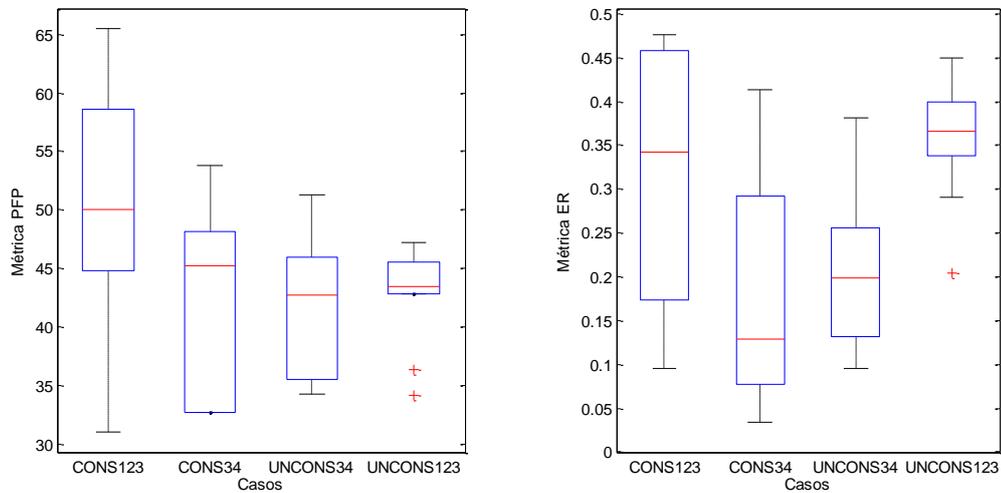
Acerca do caso UNCONS123 mostrado na Figura 38, o desempenho do método MEPSO é notável pelo alto nível de obtenção de pontos da FP_{real} , entre 60 e 70%, e reduzidos valores de ER. O método BTMO entretanto manteve o baixo desempenho de UNCONS34 com elevação dos valores de ER. O método NSGA-II demonstrou melhoria em PFP com manutenção dos níveis de ER.

A partir dos resultados de comparação entre os três métodos, percebe-se que MEPSO apresentou capacidade destacada na obtenção de soluções ótimas de Pareto, especialmente para o caso UNCONS123 cujo conjunto FP_{real} é o de maior cardinalidade. Quanto à métrica ER, demonstrou desempenho comparável ou mesmo melhor que BTMO.

A análise dos dados permite também observar que o desempenho do método BTMO para a métrica PFP mostra claro declínio com o aumento da cardinalidade de FP_{real} dos diferentes casos. Contudo, o comportamento da métrica ER não acompanha essa tendência, o que indica que a redução de desempenho não se deve à exploração ineficiente do espaço de busca, mas à diminuição do número de soluções ótimas obtidas com relação à cardinalidade do conjunto de soluções ótimas de Pareto de um determinado caso. Isso de fato ocorre por conta da própria estrutura do método BTMO: a cada iteração apenas uma solução, chamada semente, é enviada para a Lista de Pareto (LP), sendo as demais soluções não-dominadas da vizinhança recolhidas na Lista de Candidatos (LC). Assim, em n iterações do método, haverá no máximo n soluções em LP. Portanto, caso se deseje definir ao máximo a FP numa única execução do algoritmo, é necessário utilizar como critério de parada o esvaziamento da LC, o que pode resultar em elevado número de iterações. No sentido de demonstrar o quanto os resultados de BTMO são afetados por essa característica e como o método foi interrompido antes do esvaziamento da LC, mostra-se na Figura 39 o desempenho de BTMO considerando como solução final a união do conjunto LP com LC.

Pode-se observar na Figura 39 uma evidente melhora no desempenho de BTMO para a métrica PFP, apresentando resultados comparáveis ou mesmo superiores a MEPSO em UNCONS34 e UNCONS123. No entanto, percebe-se uma tendência de redução no desempenho com o aumento da cardinalidade do conjunto FP_{real} , o que é ainda confirmado com a elevação de ER, especialmente em UNCONS123. Isso indica deterioração na capacidade de exploração de regiões visitadas durante a busca, uma consequência de incorporar à LP as soluções da LC, cujas vizinhanças não foram exploradas. Logo, esse fato indica que esse recurso pode apresentar resultados satisfatórios para espaços de busca reduzidos, podendo conduzir a exploração limitada para problemas em que a FP tem elevada cardinalidade ou mesmo formada por um conjunto infinito de pontos.

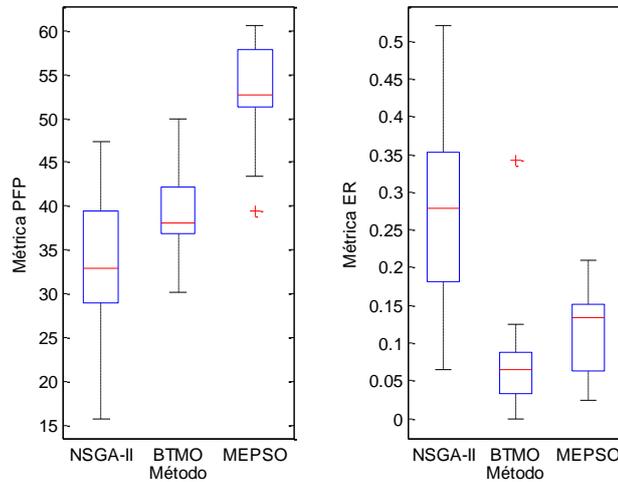
Figura 39 – Resultados obtidos pelo método BTMO considerando quatro casos e como solução final LP e LC combinados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

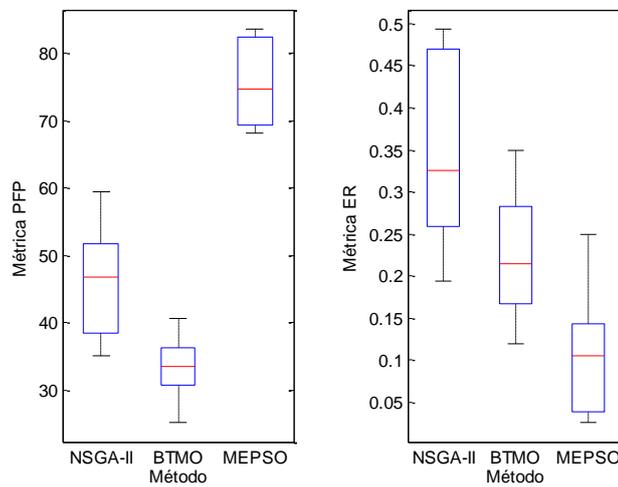
Um outro aspecto a ser notado nos resultados de comparação entre os métodos é o baixo percentual da FP_{real} obtido em alguns casos, como CONS34 e UNCONS34, mesmo para o máximo encontrado pelo MEPSO. Além disso, há ainda situações com significativa dispersão dos valores das métricas, como para o método MEPSO em UNCONS34. Uma das razões para essas características pode ser os valores atribuídos para o critério de parada. Escolhidos para analisar o desempenho dos métodos com um número menor de iterações, os valores reduzidos do critério de parada interrompem o progresso das soluções em direção ao conjunto ótimo. Com intuito de verificar se os resultados descritos são mantidos ao se permitir uma exploração mais longa do espaço de busca, foram adotados valores para o critério de parada que correspondem a aproximadamente 80% do total de combinações em cada espaço de busca. Isso equivale a uma quantidade de avaliações do vetor de função objetivo igual a 10000 para RDMT123 e 800 para RDMT34. Os resultados para os casos UNCONS34 e UNCONS123, que apresentam FP_{real} com maior cardinalidade, podem ser vistos na Figura 40 e na Figura 41.

Figura 40 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS34 com critério de parada de 80%.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 – Comparação entre o desempenho dos métodos NSGA-II, BTMO e MEPSO para o caso UNCONS123 com critério de parada de 80%.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados mostrados na Figura 40 e na Figura 41 são superiores aos apresentados na Figura 37 e na Figura 38, respectivamente. A distribuição dos valores das métricas obtidos por cada método está mais bem definida, permitindo reconhecer com mais clareza as características de cada método, com destaque para o desempenho do método MEPSO.

6.2.2.1 Alguns aspectos qualitativos

Nesta seção serão discutidas algumas questões qualitativas com relação aos métodos.

Além do desempenho dos métodos quanto à convergência, há um outro elemento relevante a ser avaliado, especialmente em relação às meta-heurísticas, que é a complexidade do ajuste dos parâmetros. Baseado na Tabela 7, nos métodos NSGA-II e MEPSO há apenas um parâmetro a ser ajustado que é o tamanho da população ou enxame de partículas. No método BTMO, por sua vez, devem ser ajustados o tamanho da vizinhança e o parâmetro *stepi* em conjunto. A busca numa vizinhança mais reduzida com um valor menor de *stepi* favorece a exploração local, podendo resultar também em maior custo computacional e problemas de convergência para FP descontínuas. Essa situação pode ser evitada ou mitigada com a ampliação da vizinhança combinada a um valor de *stepi* maior, o que reduz a capacidade de exploração local. Embora neste caso o método BTMO demande mais esforço no ajuste de parâmetros, é necessário investigar mais profundamente a influência dos parâmetros fixos de cada método sobre o desempenho para problemas com diferentes características.

Pode-se fazer uma síntese sobre o conjunto de resultados exibidos e discutidos. O método NSGA-II apresentou em alguns testes um desempenho que pode ser caracterizado, em termos gerais e em comparação com o MEPSO, como mediano, demonstrando através do comportamento da métrica ER menor eficiência na exploração das regiões visitadas. Isso pode estar relacionado não só apenas à própria estrutura do método NSGA-II, mas também à implementação desenvolvida nesta tese. Foi proposta uma codificação inteira com recombinação simples e mutação de um gerador para uma barra próxima, diferentemente de Deb et al. (2002) em que foram usadas a codificação binária, com recombinação simples e mutação de ponto único, e a codificação real com recombinação SBX (*Simulated Binary Crossover*) e mutação polinomial. Em termos de implementação deve-se salientar que uma das melhorias incorporadas por NSGA-II com relação ao seu antecessor está justamente na eliminação de parâmetros ajustáveis para o operador de diversidade.

O método BTMO apresenta uma estrutura em que a definição da FP em toda a sua extensão pode ser uma tarefa computacionalmente dispendiosa. A ausência de definição no algoritmo básico de um procedimento específico para estimular a diversidade e de limitação no tamanho das listas LP e LC podem também representar maior esforço computacional, especialmente para FP contínuas. Todavia, BTMO demonstrou destacada capacidade de

exploração local que pode ser aproveitada em abordagens que incorporam preferências do decisor e permitem restringir a busca a uma determinada região da FP.

Enfim, o método MEPSO obteve desempenho destacado quando comparado aos outros métodos, apresentando em geral pouca sensibilidade às variações na FP. Pode-se observar que, do ponto de vista dos Algoritmos Evolucionários, as equações de movimento de EPSO funcionaram como um eficiente processo de reprodução. Visto pelo lado dos métodos de enxame de partículas pode-se afirmar que o uso dos procedimentos de OM de NSGA-II permitiu o desenvolvimento de uma abordagem multiobjetivo de EPSO de forma consistente.

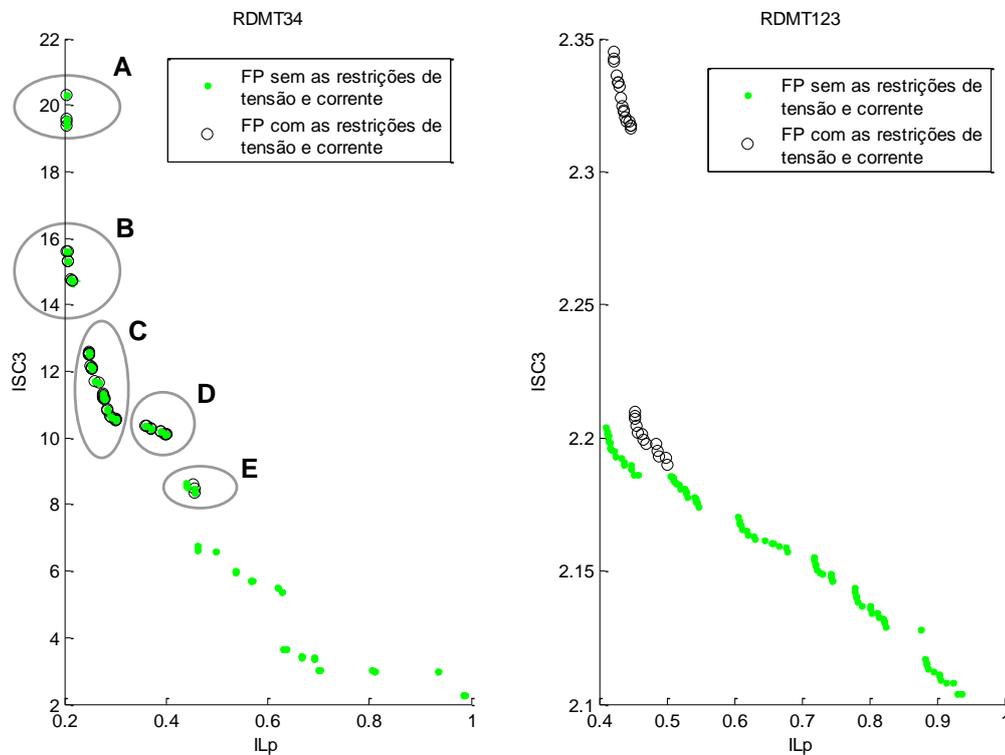
Sobre o método de avaliação de desempenho por meio dos diagramas de caixa, convém ressaltar que é uma ferramenta importante para a avaliação dos resultados, principalmente como prévia para uma comparação mais abrangente utilizando testes estatísticos. A análise de simetria das distribuições é importante para a escolha do teste estatístico, visto que alguns assumem uma determinada distribuição, como a Normal, para os dados. O uso dos diagramas de caixa permite ainda identificar de forma clara os valores discrepantes do conjunto de dados.

6.3 Análise de alocação ótima da Geração Distribuída utilizando Otimização Multiobjetivo

Nesta seção é apresentada a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 5. Usa-se uma ferramenta de OM para investigar as melhores condições de conexão de duas unidades de GD sob o ponto de vista da concessionária. A avaliação é feita considerando-se dois índices técnicos, refletindo o nível de curto-circuito e as perdas de potência ativa. A modelagem do problema foi definida na Seção 5.2 e é a mesma que foi utilizada na comparação entre os métodos.

Uma vez definido o problema, são determinadas as FP para as redes RDMT34 e RDMT123 como mostrado na Figura 42. A partir das fronteiras de Pareto de cada rede pode-se então empreender uma análise no sentido de auxiliar a tomada de decisão e de identificar padrões entre as soluções ótimas.

Figura 42 – Fronteiras de Pareto para as redes RDMT34 e RDMT123 com e sem as restrições de tensão e corrente.

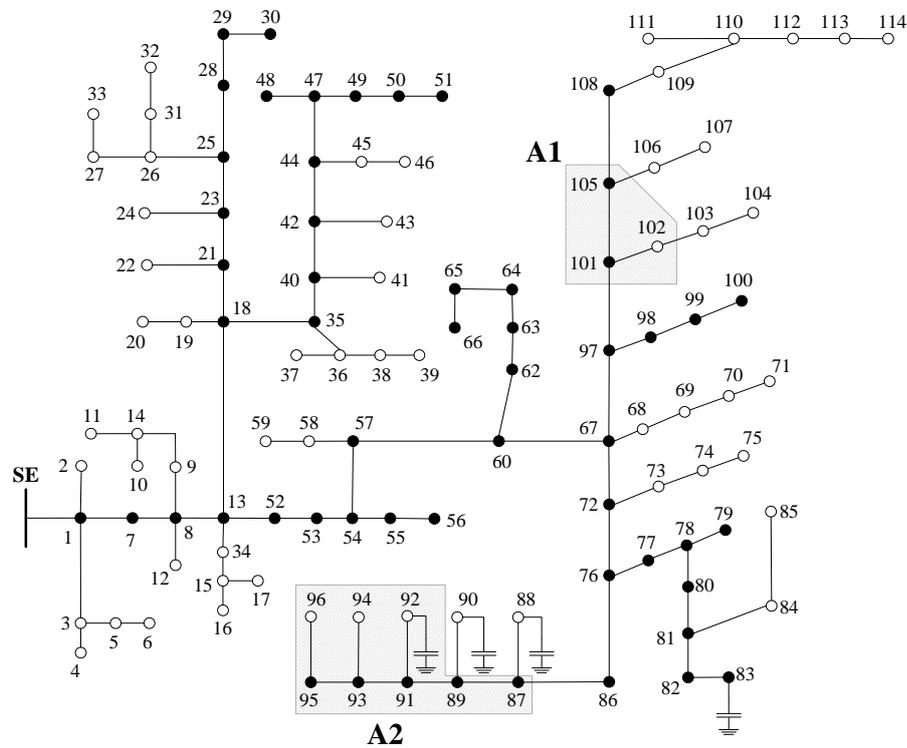


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se que em ambas as redes a FP da região factível está concentrada nas regiões de mínimo ILp, ou seja, máxima redução nas perdas de potência ativa. Isso ocorre porque, para que as tensões e correntes estejam dentro dos limites estabelecidos, os pontos de conexão da GD identificados correspondem aos nós com as maiores cargas, a nós que permitam o atendimento da demanda de uma determinada região de forma eficiente ou a pontos em que a elevação de tensão causada pela injeção de potência ativa é desejável em vista de um perfil de tensão degradado. Assim, como consequência da garantia de factibilidade os níveis de perdas ativas acabam por ser consideravelmente reduzidos.

As características de cada rede elétrica, como os níveis de tensão, localização das cargas e os comprimentos das linhas, afetam diretamente a relação entre ILp e ISC3. Considerando-se a FP obtida com as restrições, a rede RDMT123 não apresenta conflito significativo entre os objetivos, pois verifica-se uma amplitude reduzida na variação dos índices, ficando ILp entre 0,42 e 0,5 e ISC3 entre 2,19 e 2,34. Dada ainda a forma como ISC3 foi definido, a variação observada é pouco expressiva. Contudo pode resultar em impacto relevante na magnitude da corrente de curto-circuito após a conexão da GD. Na Figura 43 estão indicadas as zonas de conexão dos geradores na rede RDMT123 segundo o impacto que causam. Essas regiões foram definidas pelas variáveis de decisão dos pontos da FP com as restrições da rede RDMT123 apresentados na Figura 42, ou seja, é uma forma de representar as configurações da FP no espaço das variáveis de decisão, como descrito a seguir. Os pontos com menor valor de perdas e ISC3 mais elevados, entre 2,33 e 2,34, correspondem à conexão do gerador de maior potência na barra 76, que concentra a maior carga da rede, e a outra unidade de GD no trecho monofásico (fase A) entre as barras 109 e 114. A conexão dos geradores nas zonas A1 e A2 apresentam valores de ILp entre 0,43 e 0,45 e ISC3 acima de 2,3. Já o conjunto de pontos com ISC3 em torno de 2,2, com os valores de ILp mais elevados, se deve à conexão do gerador 1 atendendo a uma região mais próxima da SE com carregamento significativo, na vizinhança do nó 48, enquanto o gerador 2 é conectado entre as barras 109 e 114. Caso o decisor despreze as variações dos índices, a conexão da GD nas barras indicadas (76, 48 e de 109 a 114) e nas zonas A1 e A2 representa condições de impacto equivalentes.

Figura 43 – Rede RDMT123 adaptada com as zonas de conexão da GD baseado na FP restrita.



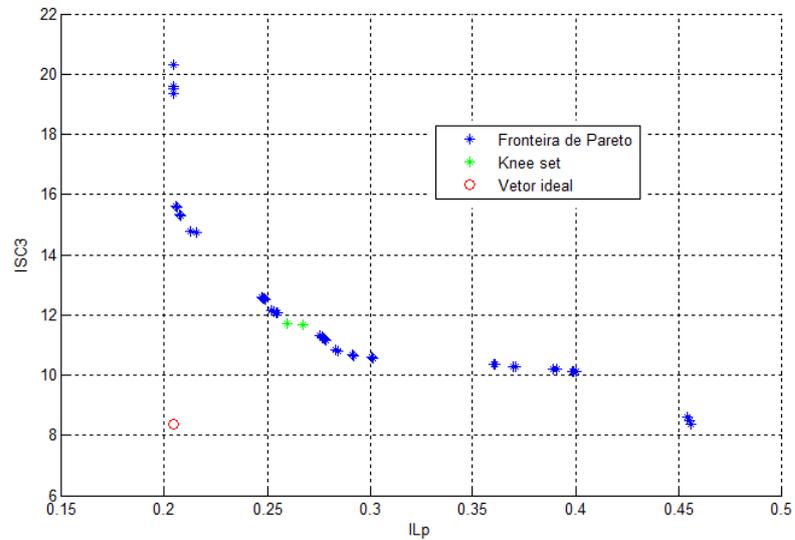
Fonte: Rede elétrica adaptada de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000b).

Com respeito à rede RDMT34, verifica-se na Figura 42 uma característica de conflito entre os objetivos mais pronunciada. Diferentemente da rede RDMT123, a rede RDMT34 apresenta ampla variação no índice ISC3 desde aproximadamente 8,0 até pouco mais de 20,0 para FP da região factível. Isso se deve principalmente ao perfil das correntes de curto-circuito da rede RDMT34: devido ao grande comprimento do alimentador desta rede, os valores das correntes de curto-circuito apresentam queda significativa à medida que se afasta da SE. Logo, a inserção das unidades de GD nas barras mais distantes da SE causa notável aumento das correntes de curto-circuito nessas barras com relação aos valores originais sem a presença da GD. Embora a alocação da GD longe da SE produza impacto negativo com relação às correntes de curto-circuito, ela apresenta como benefício a redução das perdas, pois permite que a geração ocorra próxima às principais cargas da rede, diminuindo as perdas nas linhas (algumas com dezenas de quilômetros para rede RDMT34), e fornece suporte de tensão em zonas em que os níveis de tensão se encontram mais críticos. Nesse contexto, portanto, ocorre uma relação de conflito mais acentuada entre ISC3 e ILp.

No sentido de se obter as soluções com melhor relação de *trade-off*, utilizou-se como critério de tomada de decisão a mínima distância ao ponto ideal. Considerando o exposto por

Cohon (2003), o conjunto chamado de *knee set* da FP, que corresponde a um subconjunto das soluções ótimas com a melhor relação de *trade-off*, é definido pelos pontos que estão entre aqueles com a menor distância ao ponto ideal segundo as métricas L_1 e L_∞ . Através da aplicação dessa abordagem à FP com restrições da Figura 42 são definidas as soluções da região com menor valor de ISC3, em torno de 8,0, e com ILp de aproximadamente 0,45. Essas soluções correspondem no espaço das variáveis de decisão à conexão do gerador 1 entre os nós 10, 12 e 13 e do gerador 2 na barra 18 da rede RDMT34. Isso se deve à diferença de ordem de grandeza entre os índices em que as soluções de compromisso acabam por privilegiar a redução em ISC3 em detrimento de ILp. É possível eliminar o efeito das diferenças de escala realizando-se a normalização dos valores de cada eixo. Dessa maneira são encontrados dois pontos para o *knee set* como indicado na Figura 44 com ISC3 próximo 11,7 e ILp em torno de 0,26. Na primeira dessas configurações, no espaço das variáveis de decisão, o gerador 1 é conectado na barra 18 e o gerador 2 na barra 31. Na segunda configuração obtida para o *knee set* o gerador 1 também é conectado ao nó 18 e o gerador 2 ao nó 23. Portanto, cabe ainda ao decisor avaliar o *knee set* obtido ou ainda articular alguma preferência que pode conduzir a escolha para soluções que não necessariamente apresentem o melhor compromisso. Supondo que os níveis de ISC3 sejam considerados elevados pelo decisor considerando a FP restrita, as soluções da FP sem as restrições de tensão e corrente podem ser avaliadas. Pode-se chegar a um mínimo de ISC3 próximo de 2,0 havendo, contudo, uma redução insignificante em ILp. No entanto, a análise da FP para valores de ISC3 menores que 0,4 demonstra que é possível obter redução considerável nas perdas com pequena variação nos níveis de curto-circuito. Assim, assumindo-se por exemplo a configuração com o gerador 1 na barra 1 e o gerador 2 na barra 11, tem-se ISC3 de 3,37 com ILp de 0,69. O perfil de tensão para esse arranjo dos geradores indica pequena violação do limite inferior de tensão para as três fases a partir do nó 16. A regulação da tensão pode ser efetuada alterando-se o capacitor conectado na barra 27 para 300 kVAr, por exemplo, o que produziria uma mudança desprezível nos valores dos índices.

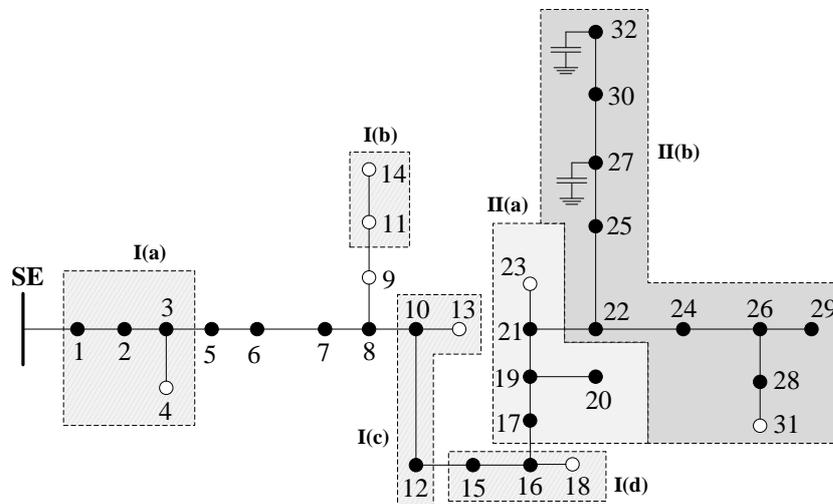
Figura 44 – Vetor ideal e *knee set*, para os valores dos objetivos normalizados, considerando a rede RDMT34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim como realizado para a rede RDMT123, foram definidas zonas na rede RDMT34 segundo o impacto causado pela GD. Para tanto, os pontos da FP foram agrupados arbitrariamente, como indicado pelas letras maiúsculas de A até E na Figura 42. Conforme esse agrupamento das soluções, foram definidas as zonas como mostrado na Figura 45, que representa as configurações da FP no espaço das variáveis de decisão. Isso é feito simplesmente pela identificação dos pontos de conexão das unidades geradoras para o conjunto ótimo de Pareto.

Figura 45 – Rede RDMT34 adaptada com as zonas de conexão da GD baseado na FP restrita.



Fonte: Rede elétrica adaptada de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000a).

É possível dividir a rede RDMT34 em duas partes: a zona I, desde a SE até o nó 16 incluindo o nó 18, e a zona II que consiste na união das zonas II(a) e II(b). Como já discutido, a alocação da GD em cada uma dessas áreas produz efeitos em geral opostos nos índices técnicos. Os pontos do conjunto A, por exemplo, com os maiores valores de ISC3 e menores ILP, correspondem à conexão dos dois geradores na zona II(b). Por outro lado, no conjunto E, que reúne os pontos do outro extremo da FP, o gerador 1 está alocado na área I(c) e o gerador 2 no nó 18, portanto ambos na zona I. Em relação aos pontos intermediários, agrupados nos conjuntos B, C e D, um dos geradores é conectado à zona I e o outro, a maior unidade geradora, é conectada à zona II. Em B o gerador 1 está ligado ao nó 20, que apresenta um carregamento elevado, e o gerador 2 está na área II(b). Em C o gerador 2 está conectado a alguns nós da zona II e o gerador 1 ou está na área I(b) ou na área I(d), sendo que nesta última configuração verifica-se os valores de ISC3 são menores e as perdas maiores que na primeira. Enfim, em D, o gerador 1 é instalado na área I(a) e o gerador 2 na área II(a). Em suma, percebe-se que o gerador 2 quando não é instalado na zona II, é alocado próxima a ela no limite da zona I visando a fornecer principalmente suporte de tensão. Já a unidade geradora 1 tende a ser conectada a montante no sentido de estabelecer compromisso com relação a ISC3.

6.3.1 Discussão sobre a análise de alocação ótima da Geração Distribuída utilizando Otimização Multiobjetivo

Acerca da análise apresentada sobre a aplicação da metodologia de OM em busca das melhores condições de alocação da GD, são feitas algumas ponderações. Pretende-se discutir o quanto a análise proposta pode interessar para a avaliação de impacto da GD e no planejamento da expansão, em vez de limitações do modelo, como por exemplo o fato da análise do *trade-off* entre os índices técnicos não refletir necessariamente o melhor compromisso em termos de custo, visto que se trata de um modelo simplificado para o teste dos métodos de OM.

A análise evidencia que a metodologia baseada em OM para a identificação do impacto da GD, relacionando-o às localizações dos geradores na rede, pode fornecer um conjunto mais amplo de informação ao decisor, o que é uma característica desejável para o planejamento. Entretanto, o estudo desenvolvido sobre os dados da FP estão restritos ao conjunto de soluções ótimas, não oferecendo garantias sobre o comportamento dos índices para as soluções dominadas. Além disso, por se tratar de um problema de minimização a FP determina os valores mínimos que podem ser obtidos para cada objetivo com a integração da GD, não oferecendo contudo os valores mais elevados de cada objetivo, o que poderia ser

uma informação relevante na análise de impacto da GD. Em suma, a análise realizada suporta a tomada de decisão considerando a possibilidade de se orientar a entrada da GD de forma ótima, o que não é comum num cenário de livre acesso à rede de distribuição.

A investigação da alocação ótima da GD pode ser fruto de interesse em condições específicas de uma concessionária ou para servir de respaldo a alguma proposta de regulamentação que procure considerar mais detalhadamente o impacto da GD, por exemplo. É interessante para uma ferramenta de planejamento, todavia, ter a capacidade de prover um conjunto de informações o mais completo possível ao decisor. Isso é uma limitação da metodologia, visto que a principal tendência atual é de que os geradores tenham livre acesso à rede e a GD de propriedade das concessionárias é inibida em alguns casos, principalmente em ambientes de mercado, ou mesmo não constitui um investimento de interesse para as empresas distribuidoras. Há ainda a questão da dependência da fonte primária de energia que é decisiva na definição do ponto de conexão da GD.

6.4 *Análise de impacto da GD com relação à capacidade e possibilidade de adiar investimentos na rede*

Considerando o problema formulado na Seção 5.3, busca-se apresentar uma análise baseada em OM para a avaliação do impacto da GD com relação ao alívio de sobrecarga e possibilidade de adiar investimentos em infraestrutura de rede. A metodologia proposta fornece ao decisor a total extensão do impacto que pode ocorrer na rede de distribuição, considerando o nível de penetração da GD e a posição que os geradores podem ocupar na rede.

Utilizou-se para este estudo o método MEPSO com um enxame de 100 partículas, Lista de Pareto de dimensão 100 e probabilidade de comunicação p de 0,2. Na Tabela 8 são mostradas a quantidade de geradores e suas respectivas capacidades para cada rede elétrica e a condição inicial das redes com relação ao índice IC.

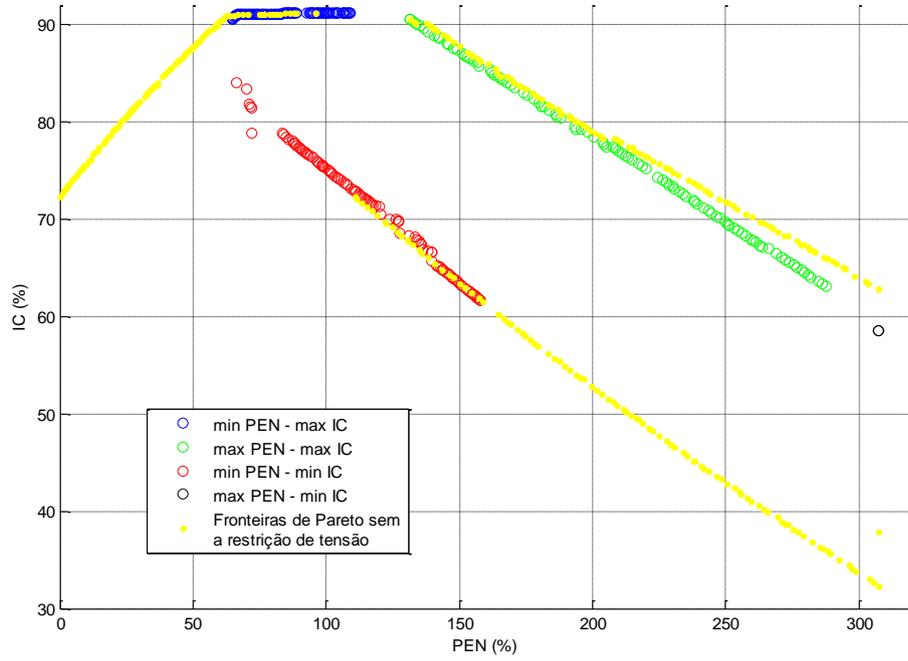
Tabela 8 – Número de unidades de GD, máxima e mínima geração permitidas e IC para as redes elétricas sem GD.

	Unidades de GD	Min. geração (kW)	Max. geração (kW)	IC₀
RDMT34	2	0,0	1.000	72,2
RDMT123	2	0,0	1.500	-26,7

Fonte: Elaboração do próprio autor.

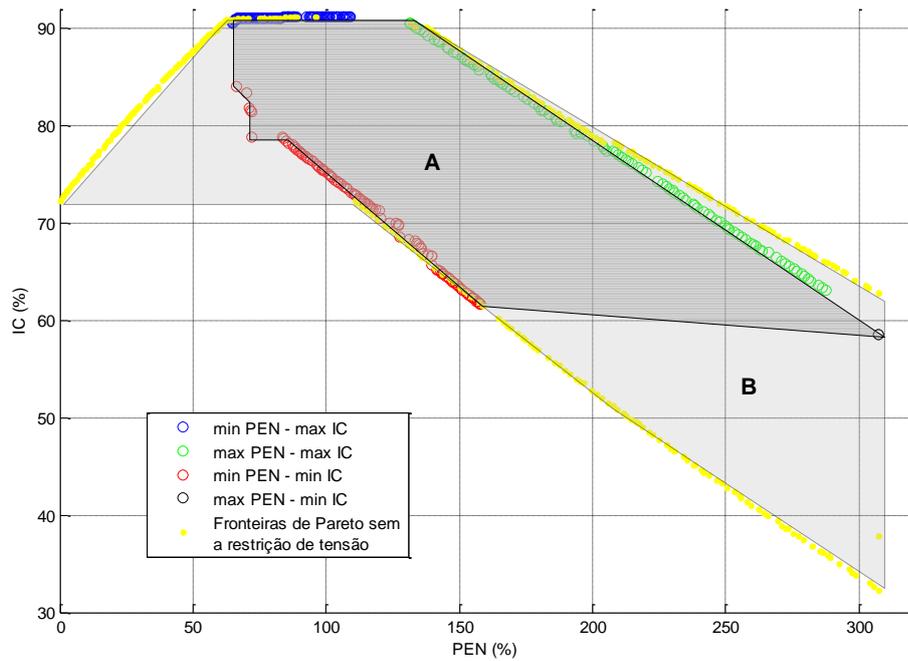
Na Figura 46 são apresentadas as fronteiras de Pareto combinando-se a minimização e maximização dos objetivos da seguinte forma: min PEN – max IC, max PEN – max IC, min PEN – min IC e max PEN – min IC, considerando a rede RDMT34. O mesmo se fez sem aplicar os limites de tensão. As fronteiras de Pareto determinadas considerando-se as restrições de tensão definem os limites de uma região dentro da qual estão todas as soluções factíveis. É possível ter pleno conhecimento dos limites positivos e negativos que podem ocorrer na rede elétrica com a penetração da GD. A região das soluções infactíveis também é determinada pelas fronteiras de Pareto indicadas em amarelo na Figura 46. A forma aproximada de ambas as regiões é apresentada na Figura 47 e indicadas pelas letras A e B para as fronteiras de Pareto obtidas com o problema restrito e irrestrito, respectivamente.

Figura 46 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC, max PEN – max IC, min PEN – min IC e max PEN – min IC, com e sem a restrição de tensão para a rede RDMT34.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 47 – Esboço das regiões definidas pelas fronteiras de Pareto para a rede RDMT34.

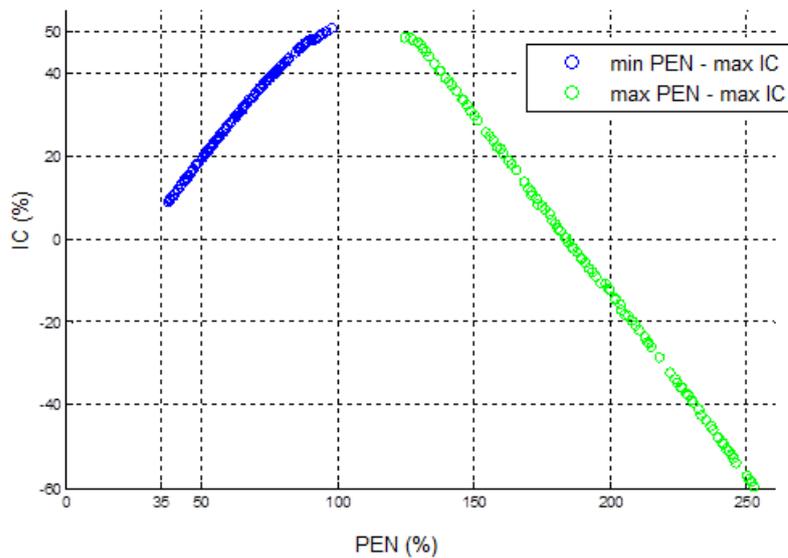


Fonte: Elaboração do próprio autor.

É importante ressaltar que todas as soluções factíveis estão na região A que está, entretanto, contida em B como visto na Figura 47, e portanto podem ser encontradas soluções infactíveis em A. O carregamento leve da rede RDMT34 não é suficiente para que se verifiquem problemas de capacidade, mesmo para um nível de penetração extremo como os 300% que, embora seja pouco provável na realidade, demonstra que IC é maior que 30%. Porém, como já mencionado, devido à distribuição das cargas na rede e às linhas longas, a rede RDMT34 apresenta dificuldade para a regulação de tensão. Isso pode ser notado na Figura 47 em que a região A, das soluções factíveis, está situada a partir de um nível de penetração próximo de 65%, que corresponde ao mínimo suporte da GD necessário para que as tensões fiquem dentro dos limites estabelecidos, dependendo ainda de condições específicas de localização e nível de geração. Pode-se salientar também o alto valor de IC, acima dos 90%, que pode ser obtido em condições específicas entre níveis de penetração de 65% e aproximadamente 110%. Tal fato ocorre não apenas pela geração local num nível ótimo, mas também pelo ajuste feito em trechos monofásicos transformados em trifásicos, algumas vezes com cabos de capacidade maior, para acomodar a GD. Finalmente, nota-se no lado direito da região A na Figura 47 a possibilidade de acomodar penetração elevada da GD na rede RDMT34, embora isso exija condições cada vez mais específicas, e possivelmente difíceis de atender na prática, de localização dos geradores e nível de geração.

Ao contrário da rede RDMT34, a rede RDMT123 apresenta carregamento elevado e sobrecarga que chega a 27% na fase A nas linhas mais próximas à SE. Primeiramente, as fronteiras de Pareto referentes a min PEN – max IC e max PEN – max IC são mostradas em detalhe, considerando a restrição de tensão para a rede RDMT123, na Figura 48. Pode-se notar a característica de conflito entre os objetivos para cada uma das fronteiras de Pareto obtidas. Como descrito na seção 5.2.2 do Capítulo 5, a FP do problema min PEN – max IC corresponde às configurações em que o aumento da penetração da GD resulta em ganho de capacidade ou elevação de IC. Como se busca minimizar PEN e maximizar IC há conflito entre os objetivos. Já a FP do problema max PEN – max IC contém as condições nas quais o crescimento em PEN reduz IC, ou seja, aumenta o congestionamento em certos ramos. Existem, por tanto, conflito com a maximização de ambos os objetivos.

Figura 48 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC e max PEN – max IC para a rede RDMT123.

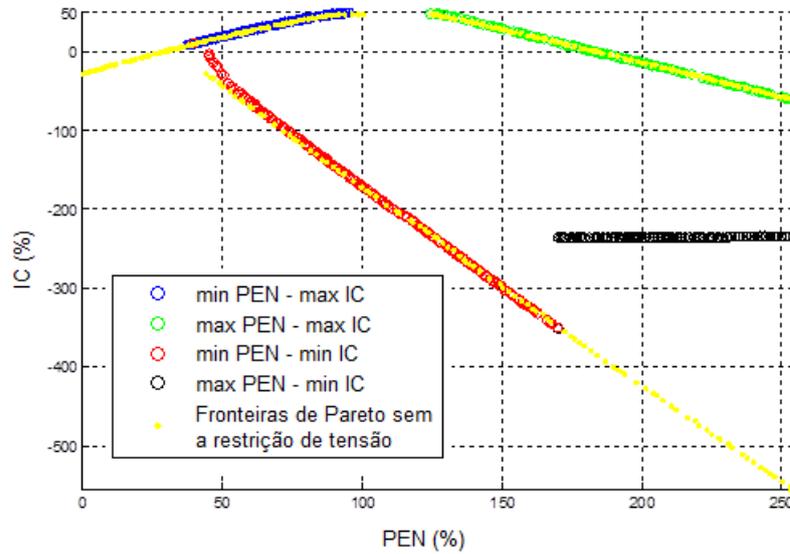


Fonte: Elaboração do próprio autor.

É necessária uma penetração de GD maior que 35% para garantir a factibilidade com relação à tensão. Isso também resulta numa melhoria em IC, que pode atingir até 10% em determinadas condições de conexão dos geradores. O valor de IC pode chegar a 50% em torno de 100% de PEN, como consequência da geração num nível adequado em pontos que permitam o atendimento local das principais cargas da rede, com destaque para os nós 48, 65 e 76. Isso proporciona alívio de corrente nas linhas mais congestionadas, em especial entre a SE e o nó 13. A análise da FP referente a max PEN – max IC mostra que a rede RDMT123 admite menor penetração da GD que a rede RDMT34, com IC nulo para um nível de penetração de aproximadamente 180%.

Um estudo semelhante ao realizado para a rede RDMT34 a partir da Figura 46 pode ser feito para a rede RDMT123 conforme a Figura 49.

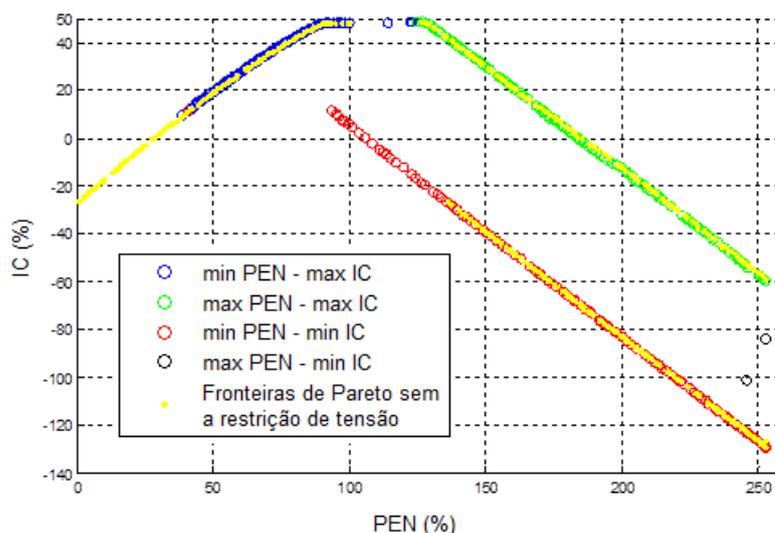
Figura 49 – Fronteiras de Pareto considerando min PEN – max IC, max PEN – max IC, min PEN – min IC e max PEN – min IC, com e sem a restrição de tensão para a rede RDMT123.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na Figura 49 que a partir de um nível de penetração de 35% podem ocorrer tanto valores positivos quanto negativos de IC. No entanto, a partir de PEN em torno de 50% há um risco evidente de se obter configurações da GD com nível de sobrecarga acentuado, ao mesmo tempo em que podem ser observados valores significativos de alívio nas linhas. Um exemplo disso é o nível de penetração de 100%, em que pode ocorrer valores de IC entre 50% e menores que -150%. Um outro aspecto investigado a partir da Figura 49 é a condição em que ocorre o impacto negativo da GD, representadas pelas fronteiras de Pareto amarelas inferiores, vermelha e preta. Notou-se como padrão nessas soluções a conexão de ao menos um gerador no trecho trifásico subterrâneo da rede entre os nós 60 e 66, com 465 m de comprimento, que apresenta os cabos com as menores capacidades de corrente. Assim, na Figura 50 é avaliado o impacto da GD sem que se permita a conexão dos geradores na seção subterrânea da rede.

Figura 50 – Fronteiras de Pareto para a rede RDMT123 sem a conexão da Geração Distribuída nos nós de trechos subterrâneos da rede.

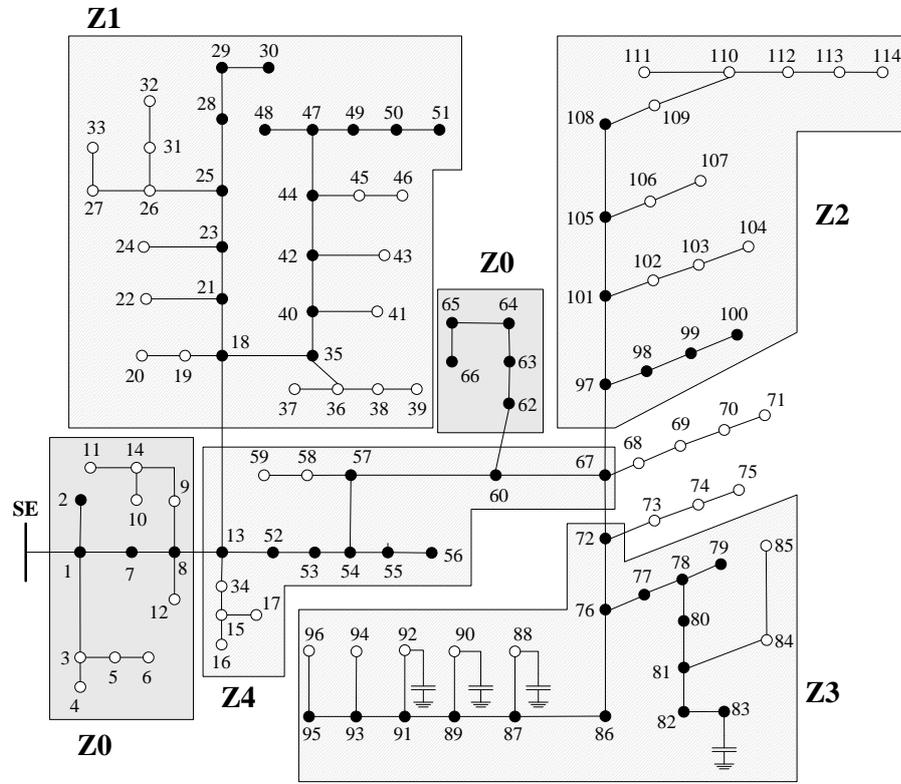


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O impedimento do acesso dos geradores aos ramos subterrâneos tem efeito notável na redução dos impactos negativos da GD. Todas as soluções factíveis apresentam IC positivo até o nível de penetração de aproximadamente 105%. Em vista disso, a conexão da GD nos nós do trecho subterrâneo deve ser avaliada com atenção: pelo fato de existir uma quantidade de carga significativa nos nós 64, 65 e 66, como visto na Figura 24, é possível obter ganhos na capacidade da rede com a geração atendendo essas cargas localmente. Contudo, a geração é limitada pelo risco de sobrecarga.

Embora a limitação da geração na seção subterrânea reduza os impactos negativos da GD, pode-se observar na região delimitada pelas fronteiras de Pareto sem restrição de tensão, na Figura 50, que podem ocorrer valores negativos de IC para PEN entre 35% e 105%. Logo, no sentido de definir condições de conexão da GD em que não haja risco de sobrecarga, mais uma vez fez-se a análise das fronteiras de Pareto com impacto negativo de IC. Foi possível identificar que a concentração dos geradores em determinadas áreas produz sobrecarga principalmente no ramo que liga a área ao restante da rede, quando a geração supera o consumo local. Uma outra condição prejudicial para IC é a injeção de potência entre a SE e o nó 13, que já apresenta congestionamento. A partir dessas constatações foi proposta uma divisão da rede RDMT123 em zonas, segundo a Figura 51. Cada área indicada pode receber apenas um dos dois geradores a serem alocados, permitindo-se a conexão apenas em nós trifásicos, representados por círculos preenchidos em preto. Exceção se faz às zonas Z0 onde o acesso da GD é vedado.

Figura 51 – Proposta de divisão da rede RDMT123 em zonas para conexão da Geração Distribuída.

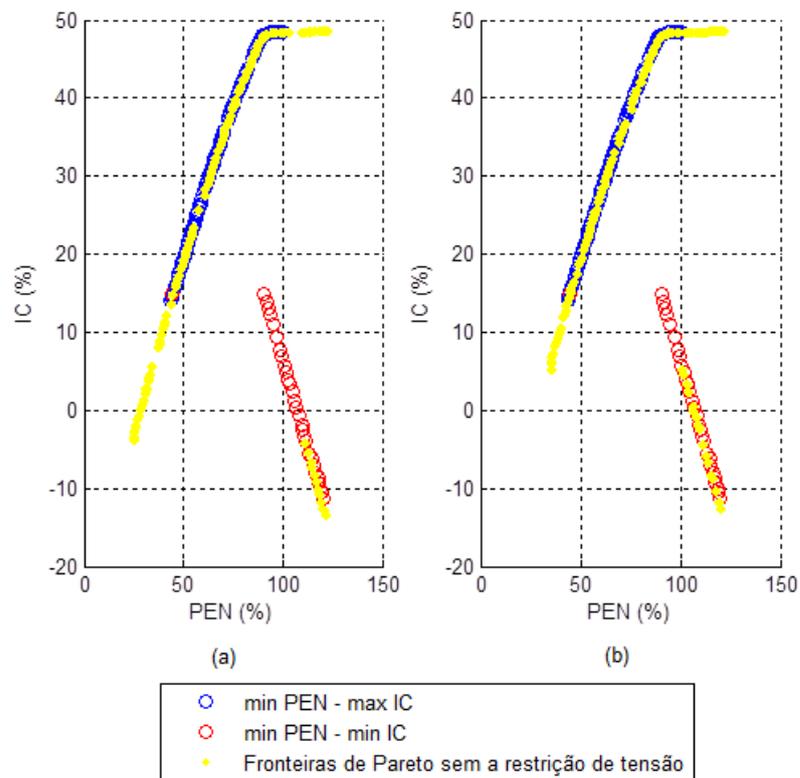


Fonte: Adaptada de IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee (2000b).

O efeito da proposta de divisão da rede RDMT123 em zonas de conexão da GD é verificado através das fronteiras de Pareto apresentadas na Figura 52. Diferentemente da Figura 50, optou-se por apresentar em detalhe as fronteiras de Pareto até um nível de penetração de aproximadamente 120%. Por isso foram apresentados apenas os casos min PEN – max IC e min PEN – min IC. Na Figura 52 (a) as curvas foram definidas a partir de um nível de penetração mínimo de 25% e em (b) definiu-se o mínimo de 35%. Assim, pode-se observar em detalhe os valores de IC para uma condição em que a factibilidade não é assegurada, em (a), e considerando o limite a partir do qual está a região factível, em (b). Na Figura 52 (a) nota-se que, apesar das soluções da região factível apresentarem IC positivo até PEN em torno de 100%, podem ocorrer soluções infactíveis com IC negativo, em parte porque esse nível de penetração pode não ser suficiente para aliviar a sobrecarga do cenário. Já na Figura 52 (b) percebe-se o benefício obtido pela divisão por zonas: ao contrário do que ocorria na Figura 50, a partir do nível de penetração de 35% até quase 100% pode-se assegurar a condição positiva de IC, ou seja, há alívio da condição de sobrecarga inicial e máximo impacto negativo da GD não produz sobrecarga. Pode ocorrer apenas violação dos

limites de tensão. Consideradas as limitações do modelo, esse resultado é importante dentro do contexto da análise da GD no adiamento de investimentos em infraestrutura para adequação da rede. Mostrou-se inicialmente que a GD pode tanto promover ganhos de capacidade como também prejuízos nesse aspecto. A análise dessa condição permitiu chegar a uma proposta em que, respeitada a divisão por zonas, é possível garantir a adequação da rede em termos de capacidade desde que estabelecido um nível de penetração da GD entre aproximadamente 35% e 100%.

Figura 52 – Fronteiras de Pareto em detalhe para: (a) nível de penetração mínimo de 25%; e (b) nível de penetração mínimo de 35%.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.4.1 *Discussão sobre a metodologia de análise de impacto da GD com relação à capacidade e possibilidade de adiar investimentos na rede*

Assim como feito com o modelo utilizado para a alocação ótima da GD na seção 6.3, a metodologia proposta na seção 5.1 do Capítulo 5 permitiu estabelecer uma relação entre o impacto que a penetração da GD causa sobre a capacidade da rede e a localização das unidades geradoras, identificando-se padrões de conexão nas variáveis de decisão das

configurações das fronteiras de Pareto. Entretanto, diferentemente do problema de alocação ótima, foi proposta a combinação da maximização e minimização das funções objetivo, possibilitando a identificação das condições extremas, tanto negativas quanto positivas, de penetração da GD. Foram definidas então zonas de conexão da GD de maneira a evitar as configurações dos geradores em que o aumento da geração pode representar até mesmo a sobrecarga de alguns ramos da rede. Um dos objetivos dessa estratégia de obtenção dos máximos benefícios e prejuízos causados pela integração da geração é expandir a análise de impacto da GD para condições de incerteza, como o livre acesso dos geradores à rede.

Os resultados obtidos pela metodologia apresentada podem auxiliar os responsáveis pelo planejamento permitindo agora conhecer a extensão do impacto da GD não apenas na condição de alocação ótima, mas considerando qualquer possibilidade de localização e nível de geração. Para o planejamento da expansão pode ser conveniente ainda avaliar algumas condições em detalhes, fixando-se a posição da GD, baseado em condições mais prováveis de inserção da geração, ou mesmo avaliando a probabilidade de que as situações extremas possam ocorrer na realidade. Isso poderia ser aproveitado na composição de cenários numa eventual análise de risco (CROUSILLAT et al., 1993; MIRANDA; PROENÇA, 1998) ou mesmo nas etapas de formulação e análise de alternativas.

Outro aspecto em que a metodologia proposta pode ter relevância refere-se à regulamentação. Sabe-se que além das questões técnicas e econômicas, a regulamentação tem efeito decisivo no desenvolvimento e aproveitamento da GD, promovendo ou inibindo os comportamentos dos agentes envolvidos. Nesse sentido, há esforços em aprimorar os mecanismos de estímulo à GD e conceitos relacionados, como as microrredes (COSTA; MATOS; PEÇAS-LOPES, 2008), buscando reduzir assimetrias na captura entre os agentes envolvidos de benefícios ou custos resultantes da introdução da GD. Dentro desse contexto a análise realizada investiga em detalhes a reconhecida dependência entre impacto causado pela inserção da GD e a localização dos geradores. Isso permite que a regulamentação incorpore mecanismos sensíveis a essa relação que, numa condição de maior presença da GD, podem explorar a possibilidade dos geradores oferecerem ganhos de capacidade da rede, e adiamento de investimentos em infraestrutura, na forma de um serviço ancilar, por exemplo. Seria importante observar essa possibilidade no âmbito da regulamentação porque atualmente na maioria dos casos pode ainda não ser justificável economicamente o uso da GD no lugar dos meios tradicionais de reforço da rede (ILEX ENERGY CONSULTING, 2004).

Quanto aos testes e à metodologia, convém destacar algumas questões. Nos resultados apresentados foram consideradas duas unidades de GD. Esse é um elemento importante na

análise visto que representa a forma como deve ocorrer a entrada da GD, seja de maneira mais concentrada ou dispersa, que representa um fator de elevada incerteza. Seria interessante também investigar em detalhes o efeito que a condição de operação mais favorável à concessionária poderia ocasionar sobre o gerador, considerando algumas das localizações identificadas. Enfim, é imprescindível um estudo de confiabilidade acerca da possibilidade da GD adiar investimentos em adequação da rede, pois é preciso analisar se uma solução baseada na GD oferece condições de confiabilidade e custo comparáveis àsquelas da rede tradicional.

7 Conclusões

O paradigma tradicional de operação e planejamento das redes de distribuição de energia elétrica passa por uma profunda mudança devendo considerar um conjunto mais amplo de objetivos e incorporar novas tecnologias e concepções, como os mercados de energia, a GD e as redes inteligentes. Essas condições acentuam ou mesmo acrescentam elementos de incerteza, dinâmica e conflito ao já complexo problema de planejamento. A utilização de meta-heurísticas de OM como ferramenta de estudo do problema mostra-se interessante por apresentar flexibilidade de formulação, por fornecer condições mais abrangentes de tomada de decisão na presença de incertezas e permitir que o decisor tenha seu papel mais bem definido durante o processo de planejamento. Apesar do considerável número de trabalhos que abordam o problema de integração da GD usando OM, existem questões que ainda demandam investigação, desde a formulação do problema e análises que podem ser empreendidas até pontos relacionados às técnicas de OM.

Quanto às meta-heurísticas de OM, fez-se um amplo conjunto de testes considerando três métodos baseados em diferentes meta-heurísticas usadas na otimização mono-objetivo: o método NSGA-II, que é um Algoritmo Genético multiobjetivo de segunda geração; o método BTMO baseado no método Busca Tabu; e a proposta MEPSO que combina as características do método EPSO a mecanismos de OM, principalmente os de NSGA-II. Esses resultados, obtidos da aplicação dos métodos a uma formulação usada para a alocação ótima da GD, constituem uma contribuição à etapa de escolha de um algoritmo. Além disso, é apresentada uma discussão detalhada relativa à estrutura de cada método que pode orientar a implementação de melhorias desenvolvidas no contexto da otimização mono-objetivo, por usuários com experiência no uso de um dos métodos apresentados. No âmbito da investigação dos algoritmos de OM, houve o desenvolvimento do método MEPSO no sentido de explorar as características de desempenho observadas com o método EPSO. O método MEPSO demonstrou desempenho destacado e robusto nos testes considerando distintas fronteiras de Pareto, apresentando um algoritmo de simples implementação e ajuste de parâmetros. Todavia, um conjunto mais amplo de experimentos deve ser realizado para verificar o desempenho do método MEPSO aplicado a problemas com diferentes características, pois as conclusões obtidas estão restritas ao problema resolvido.

Foi proposta uma metodologia de análise de impacto da GD baseada em OM, que não corresponde a um processo completo de planejamento da expansão, mas visa a colaborar nessa etapa fornecendo ao decisor um conjunto mais amplo de opções e informações. A metodologia geral foi aplicada aos dois modelos propostos, demonstrando sua flexibilidade em termos de formulação do problema.

No estudo de alocação e dimensionamento ótimos da GD foi exposta uma análise multiobjetivo completa desde a obtenção do conjunto de soluções ótimas de Pareto até a identificação das soluções de melhor compromisso. Adicionalmente, aplicou-se a metodologia de análise das soluções da FP mostrando-se como podem ser obtidas informações sobre o problema e estabelecidos padrões de impacto. Porém, o problema de avaliação do impacto da GD visto a partir da alocação ótima das unidades geradoras apresenta capacidade limitada de análise em condições como o livre acesso à rede, comum na prática.

Enfim, a integração da GD à rede foi analisada com relação à possibilidade de ganhos de capacidade e adiamento do investimento em infraestrutura, pontos destacados na literatura entre as principais oportunidades para a GD. Com o intuito de conhecer a extensão total do impacto da GD, tanto negativo quanto positivo, foi proposta uma metodologia de definição dos limites do espaço de busca assentada na determinação de fronteiras de Pareto, conforme a combinação da maximização e minimização das funções objetivo. A análise dos resultados evidenciou a relação entre o impacto da GD sobre a capacidade da rede e a localização e nível de penetração da geração: não só é possível obter benefícios de adiamento de investimentos com a GD como pode-se ter condições de integração dos geradores que antecipem os investimentos por parte da concessionária em reforço. Procedeu-se então com a avaliação dos padrões de conexão, definindo-se uma solução de zoneamento da rede de modo a garantir que a GD contribua com o alívio de sobrecarga da rede, sendo ainda permitida uma elevada penetração da geração. Essas constatações apresentam potenciais interessantes, principalmente do ponto de vista regulatório: pode-se estimular um cenário de intensa penetração da GD dirigida por uma política de incentivos a investidores; e análises como a apresentada podem colaborar com a identificação mais nítida e justa dos custos ou vantagens associados à entrada da GD nas redes de distribuição. Além disso, algumas das condições de penetração identificadas podem ser avaliadas dentro do planejamento da expansão como cenários numa análise de risco, por exemplo.

Todavia, é importante reconhecer algumas das restrições com relação à análise e à metodologia. O estudo de impacto foi todo realizado considerando-se o cenário de pico de demanda. Para que as medidas propostas tenham efeito sobre a capacidade da rede é preciso

contar com unidades de GD capazes de operar de forma confiável durante os horários de pico, o que nem sempre pode ser assegurado dada a característica sazonal e intermitente de muitas das tecnologias de GD. Acerca da metodologia, a determinação da extensão do impacto da GD como realizada apresenta como etapa mais onerosa a avaliação das soluções da FP em busca de padrões entre o impacto e as condições de conexão, o que se torna ainda mais complexo com o aumento do número de objetivos.

Resultaram do desenvolvimento desta tese de doutorado as seguintes publicações:

- MACIEL, R. S.; PADILHA-FELTRIN, A. Distributed Generation Impact Evaluation Using a Multi-Objective Tabu Search. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS - ISAP, 15., 2009, Curitiba. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p. 1-5.
- MACIEL, R. S.; ROSA, M. A.; MIRANDA, V.; PADILHA-FELTRIN, A. A Multi-objective EPSO for Distributed Energy Resources Planning. In: WORKSHOP ON APPLIED COMBINATORIAL OPTIMIZATION - VII ALIO/EURO, 2011, Porto. **Proceedings...** Porto: VII ALIO/EURO, 2011. p. 159-162.
- MACIEL, R. S.; PADILHA-FELTRIN, A.; ROSA, M. A.; MIRANDA, V. A Multi-Objective Evaluation of the Impact of the Penetration of Distributed Generation. In: IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ISGT EUROPE, 2011, Manchester. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2011. p. 1-6.
- MACIEL, R. S.; ROSA, M.; MIRANDA, V.; PADILHA-FELTRIN, A. Multi-objective evolutionary particle swarm optimization in the assessment of the impact of distributed generation. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v.89, p. 100-108, 2012.

8 Desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são apontados alguns dos principais pontos de continuidade da investigação exposta nesta tese.

O estudo das meta-heurísticas de OM pode ser expandido em várias direções. O desempenho dos métodos pode ser investigado segundo a reformulação ou acréscimos aos algoritmos básicos. Novas métricas de desempenho e ferramentas de análise devem ser aplicadas, notadamente testes estatísticos, que possibilitam obter conclusões seguras na comparação entre os métodos. Embora tenha demonstrado desempenho destacado para os dois modelos analisados, o método MEPSO necessita de verificação mais intensa em outras condições de formulação dos problemas.

No que se refere ao uso da metodologia proposta para o planejamento e regulamentação, convém realizar um estudo mais completo de algumas situações de conexão da GD identificadas do ponto de vista econômico e técnico, como por exemplo uma análise de confiabilidade comparando o uso da GD com as metodologias tradicionais de reforço da rede. Cabe ainda investigar a possibilidade de utilizar ferramentas de inteligência computacional para a análise do conjunto de soluções ótimas de Pareto, tais como as redes neurais artificiais ou estratégias de descoberta de conhecimento em base de dados.

Segundo os resultados e conclusão, é evidente o alto grau de incerteza e impacto relacionado à localização e regime de operação da GD no processo de planejamento da expansão. Uma proposta de abordagem desse problema é utilizar algumas das situações de conexão da GD identificadas como cenários a serem incluídos numa análise de risco. Isso possibilita ao responsável pelo planejamento antecipar condições adversas em termos técnicos e econômicos relacionadas à penetração da GD. No entanto, um estudo desse tipo não deve levar em conta cenários somente pelo grau de adversidade que representam, visto que podem ser de ocorrência improvável. Portanto, uma análise desse tipo seria beneficiada com a aplicação de técnicas semelhantes às utilizadas para a previsão espacial da carga, visando a reconhecer regiões da rede elétrica com maior probabilidade de conexão da GD.

Referências

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, n. 57, p. 195-204, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília, 2005. 243 p.

_____. **Nota técnica nº 0004/2011 - SRD/ANEEL**: análise das contribuições recebidas na Consulta Pública nº 15/2010, visando reduzir as barreiras para a instalação de geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes incentivadas, conectada na rede de distribuição de energia elétrica. Brasília, 2011a. 19 p.

_____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST)**: Módulo 1 - Introdução. Brasília, 2011b. 60 p.

_____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST)**: Módulo 2 - Planejamento da expansão do sistema de distribuição. Brasília, 2011c. 35 p.

_____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST)**: Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica. Brasília, 2012. 72 p.

AHMADI, M.; YOUSEFI, A.; SOROUDI, A. et al. Multi-objective distributed generation planning using NSGA-II. In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, 13., 2008, Poznan. **Proceedings...** Poznan: EPE-PEMC, 2008. p.1847-1851.

ALARCON-RODRIGUEZ, A.; AULT, G.; GALLOWAY, S. Multi-objective planning of distributed energy resources: a review of the state-of-the-art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 14, p. 1353-1366, 2010.

ALARCON-RODRIGUEZ, A.; AULT, G.; MCDONALD, J. Planning highly distributed power systems: effective techniques and tools. In: CIRED, 2007, Viena. **Proceedings...** Viena, 2007. p.1-4.

ALARCON-RODRIGUEZ, A.; HAESSEN, E.; AULT, G. et al. Multi-objective planning framework for stochastic and controllable distributed energy resources. **IET Renewable Power Generation**, Stevenage, v. 3, n. 2, p. 227-238, 2009.

BAGHZOUZ, Y. Some general rules for distributed generation - feeder interaction. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006.

BARKER, P. P.; DEMELLO, R. W. Determining the impact of distributed generation on power systems: part 1- radial distribution systems. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000, Seattle. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2000.

BAYKASOGLU, A.; OWEN, S.; GINDY, N. Taboo Search based approach to find the Pareto optimal set in multiple objective optimization. **Engineering Optimization**, Colchester, v. 4, n. 1, p. 159-173, 1994.

BURGERS, J.; OMMEN, R. V.; VERHEIJ, F. **System integration of distributed generation - renewable energy systems in different european countries**. Arnhem: Kema, 2009. 133 p.

CARPINELLI, G.; CELLI, G.; MOCCI, S. et al. Optimisation of embedded generation sizing and siting by using a double trade-off method. **IET Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 152, n. 4, p. 503-513, 2005.

CARVALHO, P. M. S.; CORREIA, P. F.; FERREIRA, L. A. F. M. Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 23, n. 2, p. 766-772, 2008.

CELLI, G. Voltage profile optimization with distributed generation. In: IEEE POWER TECH PROCEEDINGS, 2005, Russia. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005.

CELLI, G.; GHIANI, E.; MOCCI, S. et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 750-757, 2005.

_____. A multi-objective approach to maximize the penetration of distributed generation in distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS, 9., 2006, Stockholm. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006.

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

COELLO, C. A. C. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 32, n. 2, p. 109-143, 2000.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. New York: Springer, 2007. 610 p.

COHON, J. L. **Multiobjective programming and planning**. New York: Dover, 2003. 352 p.

COSTA, P. M.; MATOS, M. A.; PEÇAS-LOPES, J. A. Regulation of microgeneration and microgrids. **Energy Policy**, Oxford, n. 36, p. 3893-3904, 2008.

CROUSILLAT, E. O.; DORFNER, P.; ALVARADO, P. et al. Conflicting objectives and risk in power system planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 8, n. 3, p. 887-893, 1993.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2001. 518 p.

- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- DRIESEN, J.; BELMANS, R. Distributed generation: challenges and possible solutions. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006. p. 1-8.
- DUGAN, R. C. Computing incremental capacity provided by distributed resources for distribution planning. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2007, Tampa. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007. p. 1-5.
- EGHBAL, M.; EL-ARABY, E. E.; YORINO, N. et al. Application of metaheuristic methods to reactive power planning: a comparative study for GA, PSO and EPSO. In: ISIC - IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2007, Montreal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007.
- ELGERD, O. L. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. 604 p.
- EUROPEAN COMMISSION. **Strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future**. Brussels, 2008. Disponível em: <<http://www.smartgrids.eu/>>. Acesso em: 9 jun. 2009.
- EUROPEAN LOCAL ELECTRICITY PRODUCTION. **DNO planning approaches: Deliverable 2.2**. Brussels, 2006. Disponível em: <http://www.elep.net/files/ELEP060531_WP2_D2-2_v1.pdf>. Acesso em: 10 set. 2009.
- _____. **Distributed generation ownership issues, review of current practices, future options and European policies recommendations: Deliverable 2.4, issue 1**. Brussels, 2007. Disponível em: <<http://www.elep.net/files/WP%202.4%20Generator%20ownership%20issues.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2009.
- FUKUYAMA, Y. Fundamentals of Particle Swarm Optimization techniques. In: LEE, K. Y. e EL-SHARKAWI, M. A. (Eds.). **Modern heuristic optimization techniques**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. p.71-100.
- HAESEN, E.; ALARCON-RODRIGUEZ, A.; DRIESEN, J. et al. Opportunities for active DER management in deferral of distribution system reinforcements. In: IEEE PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION - PSCE, 2009, Seattle. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p.1-8.
- HARRISON, G. P.; PICCOLO, A.; SIANO, P. et al. Exploring the tradeoffs between incentives for distributed generation developers and DNOs. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 22, n. 2, p. 821-828, 2007.
- HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R. et al. Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects. **IEEE Power & Energy Magazine**, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 78-94, July/Aug. 2007.

IEEE PES DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE. **IEEE 34 Node Test Feeder**. Piscataway, 2000a. Disponível em:

<<http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acesso em: 25 jan. 2007.

_____. **IEEE 123 Node Test Feeder**. Piscataway, 2000b. Disponível em:

<<http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acesso em: 25 jan. 2007.

ILEX ENERGY CONSULTING. **Ancillary service provision from distributed generation**. Oxford, 2004

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Power reactor information system**.

Vienna, 2011. Disponível em: <<http://www.iaea.org/programmes/a2/>>. Acesso em: 5 dez. 2011.

JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P. et al. **Embedded Generation**. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 2000. 292 p.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Montreal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. p.908-912.

KIM, K. Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2002, Chicago. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002.

KOJOVIC, L. A. Coordination of distributed generation and step voltage regulator operations for improved distribution system voltage regulation. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006.

LAUMMANN, M.; THIELE, L.; DEB, K. et al. Combining convergence and diversity in evolutionary multi-objective optimization. **Evolutionary computation**, Cambridge, v. 10, n. 3, p. 263-282, 2002.

LI, X. A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiobjective optimization. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE - GECCO, 2003, Chicago. **Proceedings...** Chicago: GECCO, 2003. p.37-48.

LORA, E. E. S.; HADDAD, J. **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 240 p.

MASTERS, C. L. Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines. **Power Engineering Journal**, Stevenage, v. 16, n. 1, p. 5-12, 2002.

MENDEZ, V. H.; RIVIER, J.; J. I. DE LA FUENTE et al. Impact of distributed generation on distribution investment deferral. **Electrical Power and Energy Systems**, Lausanne, v. 28, n. 4, p. 244-252, 2006.

MENDONÇA, A.; MATOS, M.; PEÇAS-LOPES, J. A. A multicriteria approach to identify the adequate wind power penetration in isolated grids. In: MEDITERRANEAN

CONFERENCE ON POWER GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION – MEDPOWER, 4., 2004, Lemesos. **Proceedings...** Lemesos: [s.n.], 2004.

MIRANDA, V. Hybrid Systems. In: LEE, K. Y. e EL-SHARKAWI, M. A. (Eds.). **Modern heuristic optimization techniques**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. p.524-562.

MIRANDA, V.; FONSECA, N. EPSO - best-of-two-world meta-heuristic applied to power system problems. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION - CEC, 2002, Honolulu. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002.

MIRANDA, V.; KEKO, H.; DUQUE, A. J. Stochastic star communication topology in evolutionary particle swarm (EPSO). **International Journal of Computational Intelligence Research**, Deli, v. 4, n. 2, p. 105-116, 2008.

MIRANDA, V.; PROENÇA, L. M. Probabilistic choice vs. risk analysis - conflicts and synthesis in power system planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 3, p. 1038-1043, 1998.

MORGAN, M. G.; APT, J.; LAVE, L. B. et al. **The many meanings of "Smart Grid"**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009. Disponível em: <http://www.epp.cmu.edu/Publications/Policy_Brief_Smart_Grid_July_09.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012.

NARA, K.; HAYASHI, Y.; IKEDA, K. et al. Application of Tabu Search to optimal placement of distributed generators. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001.

NEIMANE, V. **On development planning of electricity distribution networks**. 2001. Thesis (Doctor) - Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.

OCHOA, L. F. **Desempenho de redes de distribuição com geradores distribuídos**. 2006. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2006.

OCHOA, L. F.; PADILHA-FELTRIN, A.; HARRISON, G. Evaluating Distributed generation impacts with a multiobjective index. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1452-1458, 2006.

_____. Evaluating distributed time-varying generation through a multiobjective index. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 1-8, 2008a.

_____. Time-series-based maximization of distributed wind power generation integration. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 968-974, 2008b.

PEÇAS-LOPES, J. A.; HATZIARGYRIOU, N.; MUTALE, J. et al. Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 77, n. 9, p. 1189-1203, 2007.

PRICE, S.; BASKETTE, C.; KING, M. et al. **Renewable distributed generation assessment: Sacramento municipal utilities district case study**. San Francisco: California Energy Commission, 2005. 139 p. (PIER Final Project Report, CEC-500-2005-028).

PUTTGEN, H. B.; MACGREGOR, P. R.; LAMBERT, F. C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era. **IEEE Power & Energy Magazine**, Piscataway, v. 1, n. 1, p. 22-29, Jan./Feb., 2003.

REYES-SIERRA, M.; COELLO, C. A. C. Multi-objective Particle Swarm optimizers: a survey of the state-of-art. **International Journal of Computational Intelligence Research**, Deli, v. 2, n. 3, p. 287-308, 2006.

SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aparecida do Norte terá projeto piloto em redes inteligentes**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/lenoticia.php?id=169>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2003. 784 p.

SIANO, P.; OCHOA, L. F.; HARRISON, G. P. et al. Assessing the strategic benefits of distributed generation ownership for DNOs. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 3, n. 3, p. 225-236, 2009.

SILVA, N.; STRBAC, G. optimal design policy and strategic investment in distribution networks with distributed generation. In: CIRED SEMINAR: SMARTGRIDS FOR DISTRIBUTION, 2008, Frankfurt. **Proceedings...** Frankfurt, 2008. p.1-4.

SUN, T. Y.; WU, W. C.; TSAI, S. J. et al. Particle Swarm Optimizer for multi-objective problems based on proportional distribution and cross-over operation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2008, Singapura. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008.

TAN, K. C.; LEE, T. H.; KHOR, E. F. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2001, Seul. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001.

THE GUARDIAN. **Germany pledges nuclear shutdown by 2022**. London, 2011. Disponível em: <<http://www.guardian.co.uk/world/2011/may/30/germany-pledges-nuclear-shutdown-2022>>. Acesso em: 21 nov. 2011.

THONG, V. V.; DRIESEN, J.; BELMANS, R. Using distributed generation to support and provide ancillary services for power system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLEAN ELECTRICAL POWER - ICCEP, 2007, Capri. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **The smart grid: an introduction**. Washington, 2009. Disponível em: <<http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid>>. Acesso em: 5 jan. 2012.

WALLING, R. A.; SAINT, R.; DUGAN, R. C. et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 1636-1644, 2008.

WILLIS, H. L. **Power distribution planning reference book**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2004. 1248 p.

WILLIS, H. L.; SCOTT, W. G. **Distributed power generation: planning and evaluation**. Boca Raton: CRC Press, 2000. 597 p.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION - WWEA. **World wind energy report 2010**. Bonn, 2011. 22 p.

ZOLLENKOPF, K. Bi-factorisation basic computational algorithm and programming techniques. In: REID, J. K. (Ed.). **Large sparse sets of linear equations**. London: Academic press, 1971. p.75-96.

ANEXO A – Dados do Alimentador Teste RDMT34

Tabela 9 – Dados de carga do alimentador RDMT34.

Nó	Pa (kW)	Qa (kVAr)	Pb (kW)	Qb (kVAr)	Pc (kW)	Qc (kVAr)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	15,0	7,5	12,5	7,0
2	0,0	0,0	15,0	7,5	12,5	7,0
3	0,0	0,0	8,0	4,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	8,0	4,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	2,5	1,0	0,0	0,0
9	17,0	85,	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	22,5	11,0	2,0	1,0
11	84,5	43,5	0,0	0,0	0,0	0,0
12	3,5	1,5	0,0	0,0	2,0	1,0
13	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
14	67,5	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	13,5	6,5	10,0	5,0	25,0	10,0
16	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0
19	3,5	1,5	1,0	0,5	3,0	1,5
20	150,0	75,0	150,0	75,0	150,0	75,0
21	5,5	2,5	9,5	5,0	9,5	5,0
22	10,0	5,0	17,5	9,0	61,5	31,0
23	0,0	0,0	1,0	0,5	0,0	0,0
24	43,0	27,5	35,0	24,0	96,0	54,5
25	4,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
26	24,0	12,0	16,0	8,5	21,0	11,0
27	139,5	107,5	147,5	111,0	145,0	110,5
28	0,0	0,0	14,0	7,0	0,0	0,0
29	18,0	11,5	20,0	12,5	9,0	7,0
30	0,0	0,0	24,0	11,5	10,0	5,5
31	0,0	0,0	14,0	7,0	0,0	0,0
32	20,0	16,0	31,5	21,5	20,0	16,0

Tabela 10 – Dados dos capacitores do alimentador RDMT34.

Nó	Q _{Ca} (kVAr)	Q _{Cb} (kVAr)	Q _{Cc} (kVAr)
27	100,0	100,0	100,0
32	150,0	150,0	150,0

Tabela 11 – Dados de linha do alimentador RDMT34.

Nó inicial	Nó final	Zaa (Ω /mi)	Zbb (Ω /mi)	Zcc (Ω /mi)	Zab (Ω /mi)	Zac (Ω /mi)	Zbc (Ω /mi)	Corr. Nom. Fase (A)	Comp. (pés)
SE	1	1,3238 + j 13569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	2580
1	2	1,3238 + j 1,3569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	1730
2	3	1,3238 + j 1,3569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	32230
3	4	0,0000 + j 0,0000	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	5804			
3	5	1,3238 + j 1,3569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	37500
5	6	1,3238 + j 1,3569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	29730
6	7	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	10
7	8	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	310
8	9	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	1710				
8	10	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	10210
9	11	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	48150				
10	12	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	840
10	13	0,0000 + j 0,0000	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	3030			
11	14	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	13740				
12	15	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	20440
16	17	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	36830
15	16	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	520
16	18	0,0000 + j 0,0000	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	23330			
17	19	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	10
19	20	1,3238 + j 1,3569	1,3368 + j 1,3343	1,3294 + j 1,3471	0,2101 + j 0,5779	0,2066 + j 0,4591	0,2130 + j 0,5015	230	10560
19	21	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	4900
21	16	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	5830
21	23	0,0000 + j 0,0000	2,7995 + j 1,4855	0,0000 + j 0,0000	140	1620			
22	24	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	2020
22	25	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	280
24	26	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	2680
25	27	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	1350
26	28	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	280
26	29	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	860
27	30	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	3640
28	31	0,0000 + j 0,0000	1,9217 + j 1,4212	0,0000 + j 0,0000	180	4860			
30	32	1,9157 + j 1,4281	1,9300 + j 1,4115	1,9219 + j 1,4209	0,2327 + j 0,6442	0,2288 + j 0,5238	0,2359 + j 0,5691	180	530

ANEXO B – Dados do Alimentador Teste RDMT123

Os dados de carga são omitidos para os nós em que não há carga conectada.

Tabela 12 – Dados de carga do alimentador RDMT123.

Nó	Pa (kW)	Qa (kVAr)	Pb (kW)	Qb (kVAr)	Pc (kW)	Qc (kVAr)
1	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
7	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
19	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
28	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
31	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
32	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0
33	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
35	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
39	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
41	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
42	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
45	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47	35	25	35	25	35	0,0
48	70,0	50,0	70,0	50,0	70,0	50,0
49	35	25	70,0	50,0	35	25
50	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
51	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
53	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
55	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
56	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
58	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
59	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
60	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
62	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
63	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64	0,0	0,0	75	35	0,0	0,0
65	35	25	35	25	70,0	50,0
66	0,0	0,0	0,0	0,0	75	35
68	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
69	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
70	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
71	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
73	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
74	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
75	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
76	105,0	80,0	70,0	50,0	70,0	50,0

Tabela 12 – Dados de carga do alimentador RDMT123 – continuação.

Nó	Pa (kW)	Qa (kVAr)	Pb (kW)	Qb (kVAr)	Pc (kW)	Qc (kVAr)
77	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
79	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
82	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
83	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
84	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
85	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
86	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
87	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
88	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
90	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
92	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
94	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
96	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	0,0
98	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
99	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
100	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
102	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	10,0
103	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
104	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	20,0
106	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
107	0,0	0,0	40,0	20,0	0,0	0,0
109	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
111	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
112	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
113	40,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
114	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 13 – Dados dos capacitores do alimentador RDMT123.

Nó	Q _{Ca} (kVAr)	Q _{Cb} (kVAr)	Q _{Cc} (kVAr)
83	200,0	200,0	200,0
88	50,0	0,0	0,0
90	0,0	50,0	0,0
92	0,0	0,0	50,0

Tabela 14 – Dados de linha do alimentador RDMT123.

Nó inicial	Nó final	Zaa (Ω/mi)	Zbb (Ω/mi)	Zcc (Ω/mi)	Zab (Ω/mi)	Zac (Ω/mi)	Zbc (Ω/mi)	Corr. Nom. Fase (A)	Comp. (pés)
SE	1	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	400
1	2	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	175			
1	3	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	250
1	7	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	530	300
3	4	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	200
3	5	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	325
5	6	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	250
7	8	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	530	200
8	12	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	225			
8	9	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	225				
8	13	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	300
9	14	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	425				
13	34	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	150
13	18	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	825
13	52	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	400
14	11	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250				
14	10	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250				
15	16	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	375
15	17	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	350
18	19	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250				
18	21	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	300
18	35	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1580 + j 0,4236	0,1535 + j 0,3849	530	375
19	20	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	325				
21	22	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	525			
21	23	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	250
23	24	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	550

Tabela 14 – Dados de linha do alimentador RDMT123 – continuação.

Nó inicial	Nó final	Zaa (Ω/mi)	Zbb (Ω/mi)	Zcc (Ω/mi)	Zab (Ω/mi)	Zac (Ω/mi)	Zbc (Ω/mi)	Corr. Nom. Fase (A)	Comp. (pés)
23	25	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	275
25	26	0,4576 + j 1,0780	0,0000 + j 0,0000	0,4615 + j 1,0651	0,0000 + j 0,0000	0,1535 + j 0,3845	0,0000 + j 0,0000	530	350
25	28	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	200
26	27	0,4576 + j 1,0780	0,0000 + j 0,0000	0,4615 + j 1,0651	0,0000 + j 0,0000	0,1535 + j 0,3845	0,0000 + j 0,0000	530	275
26	31	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	225
27	33	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	500				
28	29	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	300
29	30	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,1535 + j 0,3845	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	530	350
31	32	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	300
34	15	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	100
35	36	0,4576 + j 1,0780	0,4615 + j 1,0651	0,0000 + j 0,0000	0,1535 + j 0,3849	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	530	650
35	40	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	250
36	37	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	300				
36	38	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250			
38	39	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	325			
40	41	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	325
40	42	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	250
42	43	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	500			
42	44	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	200
44	45	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	200				
44	47	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	250
45	46	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	300				
47	48	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1580 + j 0,4236	0,1535 + j 0,3849	530	150
47	49	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1580 + j 0,4236	0,1535 + j 0,3849	530	250
49	50	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1580 + j 0,4236	0,1535 + j 0,3849	530	250
50	51	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1580 + j 0,4236	0,1535 + j 0,3849	530	250
52	53	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	200
53	54	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	125

Tabela 14 – Dados de linha do alimentador RDMT123 – continuação.

Nó inicial	Nó final	Zaa (Ω/mi)	Zbb (Ω/mi)	Zcc (Ω/mi)	Zab (Ω/mi)	Zac (Ω/mi)	Zbc (Ω/mi)	Corr. Nom. Fase (A)	Comp. (pés)
54	55	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	275
54	57	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	350
55	56	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	275
57	58	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250			
57	60	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	750
58	59	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	250			
60	67	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	350
60	62	1,5209 + j 0,7521	1,5329 + j 0,7162	1,5209 + j 0,7521	0,5198 + j 0,2775	0,4924 + j 0,2157	0,5198 + j 0,2775	175	250
62	63	1,5209 + j 0,7521	1,5329 + j 0,7162	1,5209 + j 0,7521	0,5198 + j 0,2775	0,4924 + j 0,2157	0,5198 + j 0,2775	175	175
63	64	1,5209 + j 0,7521	1,5329 + j 0,7162	1,5209 + j 0,7521	0,5198 + j 0,2775	0,4924 + j 0,2157	0,5198 + j 0,2775	175	350
64	65	1,5209 + j 0,7521	1,5329 + j 0,7162	1,5209 + j 0,7521	0,5198 + j 0,2775	0,4924 + j 0,2157	0,5198 + j 0,2775	175	425
65	66	1,5209 + j 0,7521	1,5329 + j 0,7162	1,5209 + j 0,7521	0,5198 + j 0,2775	0,4924 + j 0,2157	0,5198 + j 0,2775	175	325
67	68	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	200				
67	72	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	275
67	97	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	250
68	69	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	275				
69	70	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	325				
70	71	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	275				
72	73	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	275
72	76	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	200
73	74	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	350
74	75	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	400
76	77	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	400
76	86	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	700
77	78	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	100
78	79	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	225
78	80	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	475
80	81	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	475
81	82	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	250
81	84	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	675

Tabela 14 – Dados de linha do alimentador RDMT123 – continuação.

Nó inicial	Nó final	Zaa (Ω/mi)	Zbb (Ω/mi)	Zcc (Ω/mi)	Zab (Ω/mi)	Zac (Ω/mi)	Zbc (Ω/mi)	Corr. Nom. Fase (A)	Comp. (pés)
82	83	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	250
84	85	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	475
86	87	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	450
87	88	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	175				
87	89	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	275
89	90	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	225			
89	91	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	225
91	92	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	300
91	93	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	225
93	94	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	275				
93	95	0,4576 + j 1,0780	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	0,1580 + j 0,4236	530	300
95	96	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	200			
97	98	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	275
97	101	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	250
98	99	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	550
99	100	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	300
101	102	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	225
101	105	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	275
102	103	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	325
103	104	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	0,0000 + j 0,0000	230	700
105	106	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	225			
105	108	0,4666 + j 1,0482	0,4615 + j 1,0651	0,4576 + j 1,0780	0,1580 + j 0,4236	0,1560 + j 0,5017	0,1535 + j 0,3849	530	325
106	107	0,0000 + j 0,0000	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	575			
108	109	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	450				
109	110	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	300				
110	111	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	575				
110	112	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	125				
112	113	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	525				
113	114	1,3292 + j 1,3475	0,0000 + j 0,0000	230	325				

