

Uma Abordagem Evolutiva Multi-Objectivo para o Problema de Compensação de Energia Reactiva em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica

Dulce Helena Pereira Costa

Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores,
Especialidade Sistemas de Energia
Elaborada sob orientação
do Professor Doutor António Gomes Martins e
do Professor Doutor Carlos Henggeler Antunes

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

2011

AGRADECIMENTOS

Ao Professor António Gomes Martins e ao Professor Carlos Henggeler Antunes, pela orientação deste trabalho, pelo constante incentivo, imprescindível apoio, estímulo, compreensão e amizade. Não há palavras que traduzam a minha gratidão.

Ao Victor com a sua presença sempre motivadora e sem o apoio do qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao colega Carlos Barrico pela disponibilidade e esclarecimentos prestados sempre que solicitei a sua ajuda.

Às instituições que me apoiaram, nomeadamente a Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), o INESC Coimbra, a ESTSetúbal e o Instituto Politécnico de Setúbal. Devo mencionar que a FCT me atribuiu uma Bolsa de Doutoramento que permitiu que os encargos económicos inerentes à realização do trabalho ficassem totalmente cobertos pela Bolsa.

À minha família pelo imenso carinho.

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Planeamento em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica	1
1.2 Energia Reactiva na Rede de Distribuição de Energia Eléctrica	3
1.3 Optimização Evolucionária Multi-Objectivo e sua Aplicação ao Problema	4
1.4 Objectivos do Trabalho	6
1.5 Organização da Tese	6
2 INSTALAÇÃO DE CONDENSADORES NAS REDES DE ENERGIA ELÉCTRICA PARA COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REACTIVA	9
2.1 Introdução	9
2.2 Revisão histórica de Trabalhos Publicados	10
2.3 Algoritmos Evolucionários Multiobjectivo Aplicados ao Problema	16
2.4 Conclusão.....	18
3 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJECTIVO	19
3.1 Introdução	19
3.2 Conceitos fundamentais em problemas multiobjectivo	20

3.2.1	Optimização mono-objectivo	21
3.2.2	Optimização multiobjectivo.....	22
3.2.3	Utilização da frente de Pareto.....	25
3.3	Principais métodos em optimização MO	29
3.3.1	Métodos Clássicos.....	29
3.3.2	Meta-heurísticas	30
3.4	Características dos Algoritmos Evolucionários	31
3.3.1	Estratégias Evolucionárias	33
3.3.2	Algoritmos Genético.....	33
3.3.2.1	Representação das soluções	35
3.3.2.2	Avaliação de soluções	36
3.3.2.3	População.....	36
3.3.2.4	Seleção.....	36
3.3.2.5	Recombinação.....	37
3.3.2.6	Mutação.....	39
3.3.2.7	Re-inserção.....	39
3.3.2.8	Diversidade	40
3.3.2.9	CrITÉrios de paragem	40
3.5	Algoritmos Evolucionários multi-objectivo	41
3.5.1	Abordagens não elitistas	42
3.5.2	Abordagens elitistas	43
3.6	Conclusão	45
4	LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CONDENSADORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS: MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO TRÂNSITO DE POTÊNCIA	47
4.1	Introdução	47
4.2	Características Técnicas de Funcionamento da Rede	48
4.2.1	Caracterização de uma rede radial	48
4.2.1.1	Topologia Radial	48
4.2.1.2	Simplificações.....	49

4.2.1.3 Caracterização da procura.....	49
4.2.2 Qualidade de Serviço	50
4.2.3 Trânsito de Potência em Redes Radiais	52
4.2.3.1 – Equações de Funcionamento da Rede	53
4.2.3.2 – Restrições de Funcionamento	57
4.2.3.3 – Método Utilizado no Cálculo do Trânsito de Potência.....	58
4.3 Modelo Matemático.....	60
4.3.1 Condensadores	61
4.3.2 Funções Objectivo e Restrições	61
4.4 Conclusão	63
5 ALGORITMOS TESTADOS E OPÇÕES DE APLICAÇÃO	65
5.1 Introdução	65
5.2 Descrição dos Algoritmos Testados.....	65
5.2.1 Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)	65
5.2.2 Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA)	67
5.2.3 Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)	70
5.2.4 Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II).....	72
5.3 Opções na Aplicação dos AEMO Seleccionados ao Problema	75
5.3.1 Representação das Soluções	75
5.3.2 Geração de Soluções Iniciais e População	76
5.3.3 Avaliação das Soluções, Selecção e Operadores Genéticos	76
5.4 NSGA-II e Pesquisa de Vizinhança.....	77
5.5 Conclusão	80
6 TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS	81

6.1 Introdução	81
6.2 Rede Retiradas da Bibliografia	82
6.2.1 Características da Rede de 69 Nós	82
6.2.2 Resultados e Comparações Utilizando a Rede Retirada da Bibliografia	86
6.3 Rede Eléctrica da EDP Distribuição	91
6.3.1 Condensadores	93
6.3.2 Cenários de Carga	94
6.3.3 Resultados e Comparações Utilizando a Rede da EDP	96
6.3.3.1 Resultados obtidos com o MOGA.....	97
6.3.3.2 Resultados obtidos com o SPEA.....	99
6.3.3.3 Resultados obtidos com o NSGA II.....	100
6.3.3.4 Resultados conseguidos com o NSGA II com pesquisa de vizinhança	101
6.3.3.5 Análise comparativa.....	102
6.3.3.6 Considerações sobre os resultados obtidos com NSGA II com Pesquisa de Vizinhança...	103
6.4 Conclusão	116
7 CONCLUSÕES FINAIS E PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	119
7.1 Conclusões Finais	119
7.2 Orientações para Futuros Desenvolvimentos.....	120
REFERÊNCIAS.....	121
ANEXO	141

Índice de Figuras

Figura 2. 1– Rede de 10 nós proposta em Grainger e Lee (1981).....	13
Figura 2. 2 - Rede 69 nós proposta pelo trabalho Baran e Wu (1989b).....	14
Figura 3.1– Exemplo ilustrativo de uma frente de Pareto	26
Figura 3.2 – Exemplo de ordenação por frentes não dominadas.	28
Figura 3. 3– Cruzamento com um ponto de corte.	38
Figura 3. 4– Cruzamento vários pontos de corte, $i = 2$	38
Figura 3. 5– Cruzamento uniforme.	38
Figura 3. 6– Mutação uniforme.....	39
Figura 4.7 - Exemplo de uma rede de distribuição, considerando a existência de ramos laterais.	49
Figura 4.8 – Alimentador genérico.....	55
Figura 4.9 – Rede do exemplo ilustrativo do cálculo do trânsito de potência.....	59
Figura 5.1 – Detalhe gráfico do VEGA	66
Figura 5. 2 – (a) Espaço de pesquisa de um problema com duas funções objectivo e (b) classificação segundo o algoritmo MOGA.....	68
Figura 5. 3 – Preenchimento da nova população no NSGA II.....	73
Figura 5. 4 – Cálculo da distância de multidão (Deb, 2001).....	74
Figura 5.5 – Estrutura de um indivíduo.....	75
Figura 5.6 – Vector após cruzamento e/ou mutação, antes de ser ordenado.	77
Figura 5.7 – Vector após cruzamento e/ou mutação, depois de ser ordenado.....	77
Figura 5.8 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos condensadores.	78
Figura 5.9 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos locais.....	78
Figura 5.10 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos condensadores e dos locais.....	79

Figura 6.1 – Topologia da rede (rede Baran e Wu (1989)).	85
Figura 6.2 – Perfil de tensões ao longo da rede com carga de ponta.	89
Figura 6.3 – Perfil de tensões ao longo da rede com carga nominal.	89
Figura 6.4 – Perfil de tensões ao longo da rede em vazio.	90
Figura 6.5 – Fronteiras de Pareto obtidas pelos algoritmos NSGA II e NSGA II com pesquisa de vizinhança, e soluções seleccionadas.	91
Figura 6.6– Topologia da rede da EDP.	92
Figura 6.7 – Caracterização dos perfis de tensão da rede da EDP para carga máxima, média e de vazio.	93
Figura 6.8 – Curva aproximativa da zona da ponta dos diagramas de carga.	95
Figura 6.9 – Distribuição das pontas no intervalo 9 – 12 horas.	96
Figura 6.10 – Representação parcial do diagrama de carga, entre as 9 e as 12 horas, considerado para a rede eléctrica da EDP.	96
Figura 6.11 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com o MOGA.	98
Figura 6.12 – Frente de Pareto obtida com o MOGA.	98
Figura 6.13 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com SPEA.	99
Figura 6.14 – Frente de Pareto obtida com o SPEA.	99
Figura 6.15 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com o NSGA II.	100
Figura 6.16 – Frente de Pareto obtida com o NSGA II.	101
Figura 6.17 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com NSGA II com pesquisa de vizinhança.	102
Figura 6.18 – Frente de Pareto obtida com NSGA II com pesquisa de vizinhança.	102
Figura 6.19 – Comparação entre frentes de Pareto obtidas com MOGA, SPEA, NSGA II e NSGA II com pesquisa de vizinhança.	103
Figura 6.20 – Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 25, 50 e 100 iterações.	104
Figura 6.21 - Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 100, 250 e 500 iterações.	104

Figura 6.22 - Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 500, 750 e 1000 iterações.	105
Figura 6.23 – Comparação entre a frente de Pareto obtida ao fim de 20 iterações e no final das 1000 iterações.....	105
Figura 6.24 – Custo do investimento inicial face à poupança em energia conseguida ao longo dos meses: comparação entre soluções de maior e menor investimento.	108
Figura 6.25 – Fronteira de Pareto com as soluções em estudo destacadas.	109
Figura 6.26 – Investimento inicial face à poupança em energia conseguida ao longo dos meses: comparação entre várias soluções da Fronteira de Pareto.	110
Figura 6.27 – Perfil de tensão para a rede da EDP com carga máxima para três situações: sem compensação, solução de menor custo e solução de menores perdas.....	112
Figura 6.28 – Rede com a localização dos condensadores para a solução de menores perdas (solução 1).....	114
Figura 6.29 – Rede com a localização dos condensadores para uma solução intermédia (solução 3).....	115
Figura 6.30 – Rede com a localização dos condensadores para a solução de menor custo (solução 10).....	116

Índice de Tabelas

Tabela 4. 1 – Condensadores, relação capacidade e custo.....	61
Tabela 6.1 – Potência solicitada nos barramentos (rede Baran e Wu (1989)).....	83
Tabela 6.2 – Resistência e reactância dos alimentadores (rede Baran e Wu (1989)).....	84
Tabela 6.3 – Curva de duração de carga (rede Baran e Wu (1989)).	85
Tabela 6.4 – Custo das perdas em energia e tensão mínima nos barramentos da rede sem compensação (rede Baran e Wu (1989)).	85
Tabela 6.5 – Resultados selecção do local e dimensão dos condensadores.	87
Tabela 6.6 – Comparação dos custos com e sem condensadores.	88
Tabela 6.7 – Comparação da tensão e perdas com e sem condensadores.	90
Tabela 6.8 – Características Gerais dos alimentadores da rede.	92
Tabela 6.9 – Perdas na rede da EDP sem compensação, em várias situações de carga.....	93
Tabela 6.10 – Características dos condensadores (preços do catálogo português Merlin Gerin/Schneider Electric 2007)	94
Tabela 6.11 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.12.	98
Tabela 6.12 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.14.	100
Tabela 6.13 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.16.	101
Tabela 6.14 – Soluções não dominadas: nós compensados e tipo de condensador colocado, ao fim de 100 iterações.....	106
Tabela 6.15 – Soluções não dominadas: nós compensados e tipo de condensador colocado, ao fim de 1000 iterações.....	107
Tabela 6.16 - Preço e número de horas/dia em consoante o nível de carga.....	108
Tabela 6.17 – Soluções destacadas ao longo da frente de Pareto.....	109
Tabela 6.18 – Perfil de tensão ao longo da rede da EDP em situação de carga máxima: sem compensação e com as soluções de menor custo e de menores perdas.	111
Tabela 6.19 – Caracterização da Solução 1: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	112
Tabela 6.20 – Caracterização da Solução 2: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	112

Tabela 6.21 – Caracterização da Solução 3: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.22 – Caracterização da Solução 4: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.23 – Caracterização da Solução 5: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.24 – Caracterização da Solução 6: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.25 – Caracterização da Solução 7: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.26 – Caracterização da Solução 8: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	113
Tabela 6.27 – Caracterização da Solução 9: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	114
Tabela 6.28 – Caracterização da Solução 10: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.	114

Resumo

O funcionamento da rede de distribuição de energia eléctrica obedece a padrões de qualidade de serviço que implicam um planeamento dos equipamentos que a constituem capaz de atingir esses padrões considerando em simultâneo os custos associados às medidas a aplicar. A circulação de energia reactiva na rede é um dos problemas que pode ter um impacto directo quer na qualidade de serviço, quer nos custos de exploração da rede.

Uma das opções para resolver este problema por parte das operadoras da rede de distribuição consiste na instalação de equipamentos que fornecem localmente a energia reactiva solicitada pelos consumidores. No entanto, os custos associados à colocação e manutenção destes equipamentos tornam necessário determinar os locais mais adequados para a satisfação dos vários eixos de avaliação do mérito das soluções, quer os que se prendem com a qualidade de serviço e melhor funcionamento da rede, quer os que estão directamente ligados à redução de custos de exploração.

Este problema de planeamento tem sido alvo de interesse por parte de operadoras e investigadores desde meados do século XX. Em numerosas referências em revistas técnico-científicas são propostos modelos, mais ou menos aproximados da realidade, e abordagens algorítmicas que vão desde os métodos de programação matemática clássica até às meta-heurísticas, cuja utilização é sobretudo motivada pelas características combinatórias do problema. A existência de novas abordagens metodológicas, capazes de obter soluções de boa qualidade com um esforço computacional aceitável, permite actualmente aproximar as ferramentas de apoio à decisão da realidade do funcionamento da rede, incluindo a consideração explícita de múltiplos aspectos de avaliação.

Nesta tese descreve-se o desenvolvimento de um modelo de programação multiobjectivo para o problema da localização e dimensionamento de condensadores para a compensação do factor de potência em redes de distribuição considerando aspectos técnicos, económicos e de qualidade de serviço. As abordagens metodológicas implementadas permitem a caracterização da fronteira não dominada, com o cálculo de soluções diversas e bem distribuídas. Desta forma, os resultados apresentados permitem avaliar os compromissos a estabelecer entre as funções objectivo em diferentes regiões do espaço de pesquisa.

Os resultados descritos nesta tese foram obtidos recorrendo à implementação computacional de diversas abordagens metodológicas baseadas em meta-heurísticas, em particular algoritmos evolucionários. Fez-se um estudo comparativo entre elas e introduziram-se algumas modificações numa destas abordagens, as quais permitiram uma melhor adaptação ao problema e conduziram os resultados a valores substancialmente melhores aos conseguidos com a abordagem original. São ainda apresentados resultados ilustrativos relativos a uma rede cujos dados foram retirados da bibliografia, frequentemente usada para estudos comparativos, e resultados obtidos com uma rede de distribuição real.

Abstract

The operation of electric distribution systems conforms to quality of service standards, which involves an adequate equipment planning in order to achieve these standards and the simultaneous consideration of costs associated with the measures to be implemented. Reactive power flow in the electric distribution system is a problem that may have a direct impact on quality of service and operation costs.

One of the options for utilities to solve this problem consists in the installation along the network of devices that supply locally the reactive power demanded by consumers. However, due to the costs associated with the placement and maintenance of such equipment, it is necessary to find the most adequate locations to meet the multiple axes of evaluation for assessing the merits of different potential solutions, including the ones related with quality of service and network operation as well as those directly associated with the reduction of operating costs.

The reactive power planning problem has been studied using traditional mathematical programming techniques and widely reported in the scientific literature since the middle of the 20th century. Several models and algorithmic approaches have been proposed to tackle this problem, from classical mathematical programming methods to meta-heuristics, being the use of these latter mostly motivated by the combinatorial nature of the problem. Nowadays, the existence of new methodological approaches, which are able to generate good quality solutions with an acceptable computational effort, enables decision support tools to cope with more realistic issues of network operation as well as to take explicitly into account multiple aspects for evaluating potential solutions.

In this thesis, the development of a multi-objective mathematical programming model to provide decision support in the location and sizing of capacitors for reactive power compensation in electrical distribution networks is described. The mathematical model explicitly considers technical, economical and quality of service aspects. The proposed methodological approaches enable the thorough characterization of the non-dominated frontier, through the computation of diverse and well-spread solutions. The results presented enable to assess the trade-offs to be established between the competing objective functions in different regions of the search space.

The results described in this thesis have been obtained using the computational implementation of several methodological approaches based on meta-heuristics, namely evolutionary algorithms. A comparative study between some of these approaches has been carried out and the results are thoroughly described. Modifications incorporated into these algorithms, which have been specifically tailored for this problem, have revealed to provide substantially better results than the ones achieved with the original approach. Illustrative results with a benchmark network and with an actual network are presented.

1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 PLANEAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Num sistema de energia eléctrica (SEE) pretende-se fazer chegar ao consumidor a energia que este necessita em cada momento, dentro dos padrões de qualidade exigidos por lei, respeitando normas de segurança e ambientais e ao menor custo para as entidades que fornecem o serviço. É com estes objectivos de carácter geral que habitualmente se desenvolvem ferramentas que apoiam decisões de planeamento e operação destes sistemas.

Se considerarmos em mais pormenor os objectivos que se pretendem atingir no planeamento de SEE veremos que estes estão normalmente em conflito quando se considera a sua optimização em simultâneo. Esses objectivos incluem habitualmente a minimização das perdas, a minimização do investimento, a melhoria da fiabilidade, o cumprimento dos critérios de qualidade do serviço e ainda a consideração de aspectos de segurança e ambientais. O panorama mais comum nos problemas de planeamento é o de se encontrarem vários objectivos a otimizar simultaneamente, i.e. os Agente de Decisão (AD) confrontam-se quase sempre com problemas de natureza multi-objectivo. Assim, os modelos matemáticos para apoio à tomada de decisões devem considerar explicitamente os diversos eixos de avaliação do mérito das soluções, em vez de construir funções agregadoras geralmente expressas numa unidade monetária, mas que “escondem” a diferente natureza dos objectivos e os compromissos (“trade-offs”) que é necessário estabelecer entre eles para identificar soluções satisfatórias.

Assim, podemos dizer genericamente que os problemas de planeamento em redes de energia eléctrica são na sua maioria complexos, sobretudo devido ao seu carácter combinatório e à necessidade de considerar elementos não lineares, apresentam objectivos múltiplos e um número elevado de variáveis de decisão. O responsável pelo planeamento terá que decidir, perante um grande número de alternativas possíveis, qual a melhor estratégia/solução e, por isso, quanto melhores forem as ferramentas de análise, envolvendo quer a fase de construção de modelos matemáticos, quer a de obtenção de resultados, mais fundamentada será a decisão que tomar.

Dentro dos sistemas de energia eléctrica existem problemas específicos das redes de distribuição, como o tratado nesta dissertação. Estes problemas não são recentes - a história dos métodos de planeamento das redes de distribuição de energia eléctrica segue a história dos próprios SEE até aos nossos dias. No entanto, actualmente o planeamento destas redes reveste-se de maior significado devido à sua importância na economia e aos novos desafios lançados pelas questões de qualidade de serviço, sobrecarga dos sistemas e novos tipos de cargas. Por isso, o esforço para encontrar estratégias que apoiem o seu funcionamento óptimo é actualmente muito maior. Tem-se assistido ao desenvolvimento continuado de métodos mais eficientes para o planeamento das redes de energia eléctrica, o que pode ser explicado pelos enormes investimentos feitos na sua expansão e pelas exigências impostas pelos regulamentos de qualidade de serviço.

Apesar da grande dependência entre os diversos elementos dos sistemas de potência, é impossível considerar o sistema como um todo e estudar o seu planeamento como um único problema. Tradicionalmente, os SEE subdividem-se em redes de transporte e redes de distribuição de energia eléctrica, ou noutra subdivisão apoiada nas características operacionais das redes (emalhada/radial, equilibrada/desequilibrada, etc.). Para além desta sub-divisão ainda se reduz mais a complexidade do planeamento tratando problemas particulares de cada subsistema separadamente. Neste trabalho considera-se um problema das redes de distribuição radiais.

Existem diversos factores que tornam o planeamento da rede de distribuição complexo e ao mesmo tempo tão interessante. Podemos considerar apenas três para fundamentar esta afirmação: a quantidade de equipamentos, a variação das condições de funcionamento ao longo do tempo e os valores económicos envolvidos.

Em relação à quantidade de equipamentos, se considerarmos uma rede de distribuição de energia eléctrica, encontramos-nos perante um sistema com centenas de componentes: transformadores com características distintas, linhas de transmissão de diversos tipos, equipamentos de controlo, vários equipamentos de protecção, equipamentos de regulação, condensadores, entre outros. Para além da quantidade de equipamentos, o funcionamento destes está interligado, e a alteração nas características de um deles influencia o funcionamento de outros.

Em relação às condições de operação, estas variam constantemente: a variação contínua no tempo da carga solicitada pelos consumidores existentes assim como a variação das condições atmosféricas (temperatura, humidade, velocidade do vento), que influenciam muito o funcionamento do sistema; diariamente surgem novos consumidores e noutros locais desaparecem pontos de fornecimento; as exigências dos consumidores são diversas e podem variar de semana para semana; o tipo de carga utilizado pelo consumidor pode interferir, em circunstâncias particulares, no funcionamento normal da rede; os preços de venda alteram-se com frequência; a legislação muda assim como as exigências de qualidade; em determinados locais pode ser economicamente favorável o crescimento do consumo, noutros pode passar-se exactamente o contrário, e a situação pode inverter-se apenas com a saída ou entrada de um grande consumidor; os equipamentos necessitam de manutenção e muitas vezes as redes

e/ou equipamentos atingem o seu limite de carga havendo necessidade de planejar novas redes ou reforço das redes existentes.

Por último, o factor económico: a energia eléctrica tem uma importância inquestionável para as economias de todos os países, principalmente dos mais desenvolvidos. Aliada aos enormes custos financeiros, existe a possibilidade de grandes perdas no caso de haver um erro de planeamento. Nos países industrializados quase metade do investimento em sistemas de potência é feito nas redes de distribuição de energia eléctrica (Neimane, 2001).

1.2 ENERGIA REACTIVA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Como se referiu na secção anterior, num sistema de distribuição de energia eléctrica pretende-se disponibilizar a potência que o consumidor solicite em cada momento, dentro dos padrões de qualidade exigidos por lei, e aos menores custos para quem fornece o serviço.

Do ponto de vista de quem fornece a energia eléctrica, a redução das perdas de transmissão no sistema é uma das formas eficazes de reduzir os custos. Do ponto de vista de quem utiliza a energia eléctrica, há exigências de fiabilidade e de qualidade de serviço. Não existem, no entanto, muitas formas de reduzir as perdas: ou se alteram as características das linhas, o que geralmente não é técnica nem economicamente viável, ou se reduz o volume de potência que nelas circula. É nesta segunda opção que se baseia uma das estratégias para reduzir as perdas no sistema, e que atinge não só esse objectivo como pode também melhorar a qualidade de serviço prestada ao consumidor, assegurando que a tensão nos pontos de consumo se encontre dentro dos limites definidos por lei. Esta medida passa pelo fornecimento local, através de condensadores *shunt*, da energia reactiva solicitada pelos consumidores, de forma a diminuir as perdas associadas à sua circulação nas linhas.

Verifica-se que é precisamente nas redes de distribuição, devido às suas características e extensão, que se tem um maior volume de perdas, e que por isso a redução destas se torna tão importante. Segundo dados de 2005 da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE, <http://www.erse.pt/pt/Paginas/home.aspx>), em Portugal as perdas na rede de distribuição foram de 3437 GWh, 8,1% do total fornecido, enquanto as perdas na rede de transporte foram de 648 GWh, 1,35 % do total fornecido. O comprimento total da rede de distribuição é significativamente maior do que o da rede de transporte. Em Portugal, ainda segundo dados de 2005 disponibilizados pela ERSE, o comprimento total das linhas de transporte era de 6656 km, e o da Rede de Distribuição era de 205200 km.

Do lado do consumo, assiste-se ao aumento de cargas com carácter indutivo (motores, transformadores, lâmpadas de descarga, fogões e fornos de indução, entre outros), os quais, para além da energia activa necessária ao funcionamento de todas as cargas, necessitam também de energia reactiva (indutiva). Enquanto a energia activa é sempre consumida e convertida em trabalho, a potência reactiva circula entre a carga e a fonte, sobrecarregando todo o sistema e elevando o volume de perdas, sem que exista muito interesse por parte da

entidade fornecedora na prestação desse serviço. Apenas os clientes em MAT, AT, MT e BTE, são penalizados no tarifário pela energia reactiva que forneçam e/ou recebam da rede.

O fornecimento local de energia reactiva, através de condensadores *shunt* colocados em pontos específicos da rede de distribuição, diminui a amplitude da corrente que circula nos alimentadores, reduzindo a queda de tensão entre o emissor e o receptor. Correntes menores têm como consequência menores perdas activas e reactivas, e a redução de perdas permite obter um ganho económico directo, uma vez que representa menos encargos na aquisição de energia pelos distribuidores à rede de transporte. Para além disso, a redução de corrente nos equipamentos e linhas da rede de distribuição reduz a carga a que estes estão sujeitos, podendo atrasar a necessidade de novos investimentos para reforçar a capacidade da rede.

São muitas as vantagens de utilizar condensadores em SEE, nomeadamente ao nível da distribuição. Estas podem ser resumidas nos seguintes pontos (Westinghouse Electric Corporation, 1965):

- Redução na componente reactiva da corrente nas linhas.
- Melhoria do nível da tensão nos pontos de consumo.
- Melhoria na regulação da tensão.
- Redução de perdas de potência activa (RI^2) no sistema, por redução da corrente.
- Redução de perdas de potência reactiva (XI^2) no sistema, por redução da corrente.
- Aumento do factor de potência dos geradores.
- Diminuição da procura de energia reactiva junto dos geradores, possibilitando o aumento da produção de energia activa, se a turbina o permitir.
- Diminuição da carga reactiva nas linhas, possibilitando o alívio no caso de se estar no limite de carga, ou permitindo o crescimento da transmissão de potência activa.
- Redução do investimento em equipamentos relativamente à potência fornecida.

A instalação de pontos de fornecimento local de energia reactiva, como os condensadores *shunt*, fornece às empresas de distribuição de energia eléctrica um instrumento efectivo para melhorar a gestão da rede. No entanto, a sua instalação representa um custo. Por este motivo, o planeamento da energia reactiva nas redes de distribuição deve utilizar as ferramentas que permitam otimizar quer os custos, quer os benefícios que advêm da sua colocação.

1.3 OPTIMIZAÇÃO EVOLUCIONÁRIA MULTI-OBJECTIVO E SUA APLICAÇÃO AO PROBLEMA

O problema do planeamento da energia reactiva nas redes de distribuição de energia eléctrica tem sido alvo de interesse e estudo desde os anos 50. Este problema revela-se de difícil

resolução devido aos vários objectivos que se pretendem otimizar e às próprias características técnicas de operação da rede.

Problemas complexos, tal como o tratado nesta dissertação, que envolvem aspectos de avaliação múltiplos, conflituosos e incomensuráveis, de natureza combinatória (em resultados das possibilidades de tipo de equipamentos e potencial local de instalação), necessitam de modelos matemáticos de apoio à decisão que incorporem explicitamente esses aspectos de avaliação como funções objectivo, em vez de os agregar num único indicador de custo ou benefício económico.

O problema do planeamento de energia reactiva foi, neste trabalho, tratado através de um modelo matemático não linear com dois objectivos a otimizar e diversas categorias de restrições, estando as variáveis de decisão essencialmente associadas ao tipo de equipamento a instalar e ao respectivo local de instalação. Um modelo como o aqui proposto permite compreender a natureza conflituosa dos objectivos e os compromissos subjacentes, de cuja avaliação depende a classificação de uma solução como satisfatória, identificando e tornando possível a comparação entre as soluções não dominadas do problema. Uma solução não dominada (eficiente, óptima de Pareto) é uma solução admissível para a qual não é possível melhorar simultaneamente todas as funções objectivo; i.e., a melhoria numa função objectivo apenas pode ser alcançada aceitando piorar, pelo menos, uma outra função objectivo. Deste modo, a utilização de um modelo mais realista permite apoiar os AD nos processos de análise e de decisão. Face a um conjunto de potenciais soluções os AD poderão verificar os compromissos existentes em diferentes regiões do espaço de pesquisa face aos objectivos em jogo, uma vez que não existe uma solução melhor que todas as outras em todos os aspectos de avaliação, tal como na realidade acontece.

As características não lineares e combinatórias deste problema em conjunto com a existência de múltiplos objectivos condicionam a escolha dos métodos possíveis para a sua resolução. As abordagens evolucionárias, que replicam num contexto de optimização os processos Darwinianos de evolução e sobrevivência dos mais aptos, têm a capacidade de trabalhar em cada iteração (geração) com uma população de soluções. Como em problemas de optimização multi-objectivo é necessário determinar um conjunto de soluções não dominadas representativas do espaço de pesquisa em vez de uma única solução óptima, este tipo de abordagens ajusta-se particularmente bem a estes problemas.

Pretende-se, ao utilizar este tipo de abordagens na resolução de um problema multi-objectivo (MO), determinar uma frente óptima de Pareto, a qual deverá convergir o mais possível para a frente óptima de Pareto real. De notar que, no contexto destas abordagens, em problemas reais, normalmente só é possível saber se uma solução é dominada quando se calcula outra que a domina. Assim, as soluções não dominadas deveriam designar-se por soluções potencialmente não dominadas. No entanto, habitualmente, para simplificar a linguagem, utiliza-se a designação de soluções não dominadas e de conjunto de soluções não dominadas (e consequentemente de frente óptima de Pareto) com o sentido de designar o conjunto de soluções potencialmente não dominadas, quer este corresponda ou não ao conjunto de

soluções realmente não dominadas. Para além de se pretender determinar a frente óptima de Pareto, e que esta convirja o mais possível para a frente real, pretende-se também garantir a diversidade das soluções que a compõem de modo a dispor de informação sobre “trade-offs” entre os objectivos associados a soluções em diferentes regiões do espaço de pesquisa.

Os Algoritmos Evolucionários Multi-Objectivo (AEMO) constituem, assim, o tipo de abordagens mais adaptadas às características do problema do planeamento de energia reactiva nas redes de distribuição de energia eléctrica.

1.4 OBJECTIVOS DO TRABALHO

Pretende-se com este trabalho desenvolver ferramentas que contribuam para melhorar a qualidade de serviço aos consumidores finais, a um custo mínimo para as empresas fornecedoras. Para tal orienta-se o estudo para o problema do planeamento da energia reactiva em redes de distribuição. A colocação de condensadores em pontos seleccionados da rede permite atingir directamente os seguintes propósitos: reduzir as perdas nas linhas, com consequente redução de custos de fornecimento; contribuir para a melhoria do perfil de tensões de serviço ao longo da rede.

Foi desenvolvido um modelo de programação multiobjectivo considerando aspectos técnicos, de qualidade de serviço e de custo, permitindo quer a caracterização da fronteira não dominada (calculando soluções diversas e bem distribuídas), quer a obtenção de soluções não dominadas de compromisso. Assim, pretende-se fornecer a um AD o suporte necessário para avaliar as soluções do problema, quando existem vários objectivos em conflito.

Pretende-se também explorar as abordagens existentes que sejam mais adequadas para tratar problemas complexos de natureza combinatória e não linear, características presentes no problema do planeamento da energia reactiva. Para tal, foram implementadas computacionalmente diversas abordagens metodológicas baseadas em meta-heurísticas, em particular de algoritmos evolucionários, quer para efeitos de obtenção e análise comparativa de resultados, quer para realizar algumas experiências de adaptação das abordagens existentes às características do problema.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, cada um dos quais caracteriza diferentes fases do trabalho realizado. Neste primeiro capítulo é descrita a motivação e enquadramento do trabalho realizado e dos objectivos propostos. Os restantes capítulos encontram-se organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica sobre os trabalhos divulgados em publicações científicas da área sobre a utilização de condensadores em redes de distribuição de energia eléctrica para compensação de energia reactiva.

- Capítulo 3: Neste capítulo consideram-se os principais conceitos associados à optimização MO. Referem-se os métodos existentes para resolver este tipo de problemas, com especial atenção nos algoritmos evolucionários. Estes algoritmos são descritos em mais pormenor assim como as características das abordagens evolucionárias dedicadas a problemas MO.
- Capítulo 4: Este capítulo é dedicado ao modelo matemático proposto para o problema, considerando principalmente as características técnicas associadas ao funcionamento da rede de distribuição de energia eléctrica.
- Capítulo 5: Neste capítulo descrevem-se com mais pormenor os AEMO testados na resolução do problema proposto, as opções feitas na sua aplicação, e as alterações introduzidas na abordagem que produziu melhores resultados.
- Capítulo 6: Apresentam-se neste capítulo as redes de teste seleccionadas, os testes computacionais realizados e a análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 7: Neste capítulo final apresentam-se as conclusões do trabalho realizado que conduziu à produção desta dissertação, assim como orientações para futuros desenvolvimentos sobre o mesmo tema.

2

INSTALAÇÃO DE CONDENSADORES NAS REDES DE ENERGIA ELÉCTRICA PARA COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REACTIVA

2.1 INTRODUÇÃO

A instalação de condensadores em redes de distribuição é referida na literatura científica desde a década de 1950, com a compensação feita junto das subestações, no início dos alimentadores principais. De notar que esta prática se mantém ainda hoje, para que as empresas distribuidoras não tenham que pagar a energia reactiva consumida na rede que exploram a quem detém o sistema de transporte.

Entretanto, também devido às facilidades proporcionadas pelo aparecimento de baterias de condensadores com uma menor relação peso/capacidade, começaram a colocar-se condensadores em pontos mais próximos das cargas. Esta prática mostrou trazer benefícios para a redução de perdas e melhoria do nível de tensão nos pontos de consumo.

Com a colocação dos condensadores ao longo da rede de distribuição, começaram a surgir questões sobre quais seriam os melhores locais para o fazer: quais os pontos da rede em que a compensação seria mais eficaz e qual a capacidade dos condensadores a colocar. Destas questões nasce o problema que continua a manter o interesse de empresas e investigadores.

Este interesse é confirmado pelas referências a trabalhos sobre este tema que surgem publicados desde 1956 (Neagle e Samson, 1956) até ao presente.

O número de publicações na literatura técnica e científica da área não permite fazer uma revisão exaustiva sobre o tema da colocação de condensadores em redes de distribuição. Optou-se por, na primeira parte desta secção, fazer uma breve revisão histórica, com os artigos mais relevantes publicados, mas sem aprofundar cada trabalho em pormenor. De referir que nos primeiros anos é relativamente fácil encontrar todos os trabalhos, mas esta tarefa torna-se impraticável a partir dos anos oitenta, com o aumento número de revistas científicas e de trabalhos publicados.

Até 1987 existe um conjunto de relatórios técnicos do IEEE, AIEE Committee Report (1953, 1956 e 1958), IEEE Committee Report (1972, 1978 e 1983), IEEE VAR Management Working Group Report (1987), que fazem uma revisão bibliográfica dos artigos técnicos e científicos publicados durante um período definido de tempo. À excepção do último, todos os outros são muito abrangentes, e consideram todos os assuntos relacionados com condensadores, incluindo a compensação em redes radiais. Nos primeiros anos há muitas referências a condensadores série, e nos finais dos anos cinquenta surgem mais referências à utilização de condensadores *shunt*. Em Bortignon (1995), Carlisle (1997), Ng et al. (2000), Pires (2001), Mekhamer et al. (2002) e Pires et al. (2007a) podem também encontrar-se revisões bibliográficas sobre este tema.

Apresenta-se nas secções seguintes uma selecção das publicações científicas nesta área, mencionando-se os trabalhos mais proeminentes e referenciados, sempre apresentados por ordem cronológica. Esta selecção permite ter uma visão sobre a importância e actualidade do problema.

Numa segunda parte faz-se uma revisão dos trabalhos mais recentes que propõem abordagens baseadas em Algoritmos Evolucionários Multiobjectivo (AEMO) para a resolução do problema.

2.2 REVISÃO HISTÓRICA DE TRABALHOS PUBLICADOS

Esta secção é dedicada à revisão, usando a ordem cronológica, dos artigos mais relevantes e mais citados por outros trabalhos que se seguiram.

Até 1980

Este é o período inicial de interesse pelo tema da colocação de condensadores ao longo da rede. Todos os trabalhos consideram carga uniformemente distribuída e um único alimentador sem derivações. Quase todos utilizam métodos analíticos, com excepção de Duran (1968), e todos, com a excepção de Petrelt (1971), têm como objectivo principal a redução de perdas de potência ou energia. Alguns autores tentam obter “regras” para facilitar a determinação dos locais e capacidade dos condensadores, Cook (1959 e 1961) e Schmill (1965), mas estas “regras” são válidas apenas se se considerarem as simplificações excessivas propostas. Estes trabalhos têm o mérito de serem os primeiros estudos sobre o tema e de, apesar das simplificações, exporem com clareza as vantagens de colocar a compensação junto dos pontos de consumo. De seguida é feito um resumo ilustrativo dos principais trabalhos, apresentados por ordem cronológica.

Neagle e Samson, (1956): Como se mencionou na secção anterior, a primeira referência encontrada sobre este problema data de 1956. Os autores abordam o problema da colocação de condensadores *shunt* ao longo do alimentador primário do sistema de distribuição, referindo que esta prática se deve às vantagens económicas que resultam da colocação destes equipamentos junto das cargas, e à disponibilidade recente de condensadores para colocar nos postes da rede de distribuição. Neste trabalho os autores ignoram o custo dos condensadores e referem-se apenas à redução de perdas, em potência activa, conseguidas

com a sua instalação. A carga é considerada uniformemente distribuída, o que é uma simplificação frequente nestes primeiros trabalhos.

Cook (1959 e 1961): No trabalho de 1959, Cook considera a aplicação de condensadores numa rede com carga uniformemente distribuída. O objectivo neste caso é a redução de perdas em energia, uma vez que o autor considera que a carga varia no tempo. Este trabalho define uma regra que ficou conhecida como a regra dos 2/3: para se maximizar a redução de perdas, deve colocar-se um banco de condensadores com capacidade igual a 2/3 da potência de pico, à distância da subestação de 2/3 do comprimento total do alimentador. No artigo seguinte, de 1961, Cook estende o seu trabalho, considerando agora condensadores fixos e variáveis. Os benefícios económicos são evidenciados através da redução de perdas em potência e energia.

Maxwell (1960): O autor faz uma boa exposição sobre os benefícios da colocação de condensadores ao longo da rede. O método proposto apenas pretende ser um método de auxílio na selecção de “bons locais” para colocar a compensação, referindo o próprio autor que a solução óptima é difícil de encontrar.

Schmill (1965): Este trabalho considera cargas uniformemente distribuídas nos alimentadores, mas já estende o trabalho a cargas variáveis. É um trabalho de ampliação dos de Cook (1959 e 1961), referindo-se também à regra aplicável a cargas uniformemente distribuídas e condensadores fixos, tal como Cook com a regra dos 2/3.

Chang (1967, 1968, 1969, 1972): Os dois primeiros trabalhos de Chang (Chang 1967, 1968) são muito semelhantes aos trabalhos publicados até essa altura por outros autores, utilizando as simplificações habituais: um único alimentador com cargas uniformemente distribuídas e uma carga concentrada no seu final. Os trabalhos seguintes são extensões dos trabalhos iniciais, com a proposta de uma aplicação computacional desenvolvida para resolver o problema e a inclusão de cargas de diferentes tipos.

Duran (1968): O método de localização e cálculo da capacidade dos condensadores apresentado neste trabalho é diferente dos apresentados até então. Os métodos utilizados eram analíticos, e envolviam a obtenção do extremo de uma função. Duran trata o problema como sendo de programação dinâmica, desenvolvendo um método de optimização em várias fases.

Petrelt (1971): Este é dos primeiros trabalhos em que o objectivo principal não é o económico que advém da redução das perdas, mas sim a melhoria do perfil de tensões na rede.

Bae (1978): Este trabalho retoma o iniciado por Neagle e Samson, (1956), baseando-se num método analítico para resolver o problema. Continua a utilizar as simplificações habituais de carga uniformemente distribuída e um único alimentador.

Entre 1980 e 2000

Nos anos oitenta surgiram os trabalhos mais referenciados na literatura científica sobre a colocação de condensadores em redes de distribuição radiais, como os de Grainger e Lee (1981), Grainger e Civanlar (1985) e Baran e Wu (1989a e 1989b).

Desde o início dos anos oitenta que se nota um grande avanço no estudo deste problema, uma vez que, com o surgimento de novos métodos e de recursos computacionais capazes de os suportar, também surgiram novas oportunidades de o tratar. Abandonam-se as simplificações menos realistas, como a existência de um único alimentador ou a carga uniformemente distribuída, e os modelos utilizados tornam-se mais próximos da realidade. No entanto, ainda há muitos trabalhos que linearizam o problema (Fernandes et al. (1983), Venkataramana et al. (1987), Iba et al. (1988), Noureddine e Chandrasekaran (1992), Deeb e Shahidehpour (1993), entre muitos outros), apesar de este ser intrinsecamente não linear.

Começa também a revelar-se um maior interesse não só na colocação e dimensionamento dos condensadores, mas também no seu controlo. Bunch e tal. (1982), Kaplan (1984), Kearly et al. (1991), Brindenbaugh e tal. (1992), Salama et al. (1996), entre muitos outros, consideram o problema de operação dos condensadores colocados na rede.

Alguns trabalhos, Chen et al. (1995), Wang et al. (1997), Kim e You (1999) entre outros, desenvolvem ferramentas para o apoio à colocação de condensadores em redes com características particulares, nomeadamente para redes desequilibradas.

Os objectivos da colocação de condensadores na rede de distribuição tornam-se mais diversificados. Embora a maior parte dos trabalhos tenha como objectivo principal a redução de perdas em potência ou energia, existem também muitos outros em que a preocupação principal é a de conseguir obter um perfil de tensões dentro do intervalo estipulado por lei, tal como o de Venkataramana et al. (1987), Qui e Shahidehpour (1987), Cova et al. (1995), Vaahedi e tal. (1999), Kim e You (1999), entre outros.

Começam nesta época a aparecer alguns trabalhos em que os modelos reflectem a natureza multiobjectivo (MO) do problema, mas poucos em que a metodologia adoptada para a resolução respeite essa característica, tal como em Nimura et al. (1993), Chen e Liu (1994 e 1995), Jwo et al. (1995), Chen (1998), Venkatesh et al. (1999), entre outros. Isto é, há modelação MO mas os métodos de resolução baseiam-se depois apenas na optimização de uma função escalar fixa que agrega as diferentes funções. Um maior número de trabalhos com modelos MO surge em revistas científicas da área depois de 2000.

Começam então a ser utilizados métodos de programação matemática e abordagens meta-heurísticas, nomeadamente:

- programação linear inteira mista, Iyer et al. (1984), Aoki et al. (1988), Baran e Wu (1989a e 1989b), entre outros;
- programação quadrática, Ertem (1983), Grudin (1989), entre outros;
- heurísticas, Salama e Chikhani (1993), Shao et al. (1994), entre outros;

- *simulated annealing*, Chiang et al. (1990a e 1990b), Hsiao et al. (1993), Chen e Liu (1995a e 1995b), Ghose et al. (1998), entre outros;
- pesquisa tabu, Huang et al. (1996), Mori e Ogita (1999 e 2000) entre outros;
- algoritmos evolucionários Ma e Lai (1996), entre outros;
- algoritmos genéticos, Iba (1994), Sundhararajan e Pahwa (1994), Lee et al. (1995), Kim e You (1999), entre outros.

Surgem ainda alguns trabalhos em que se aplicam metodologias baseadas em inteligência artificial, sobretudo:

- lógica difusa, Nimura et al. (1993), Chin e Lin (1994), Ng e Salama (1995), Venkatesh et al. (1999), entre outros;
- redes neuronais, Dash et al. (1991), Zhu et al. (1998), entre outros.

São em seguida resumidas as principais contribuições dos artigos mais destacados por trabalhos posteriores, nomeadamente os de Grainger e Lee (1981), e Baran e Wu (1989a e 1989b).

Grainger e Lee (1981a):

Este trabalho é uma das primeiras publicações (embora exista uma do mesmo autor, Grainger et al. (1980), mas não tão referenciada), de um trabalho que teve sequência em várias publicações pelo mesmo grupo de autores, Grainger e Lee (1981b), Grainger e Lee (1982), Grainger et al. (1982), Grainger et al. (1983), Grainger et al. (1984), Grainger e Civanlar (1985), Civanlar e Grainger (1985a e 1985b), entre outros. Estas são as referências marcantes sobre colocação e controlo de condensadores em redes de distribuição radial desta época.

A primeira publicação, Grainger e Lee (1981), é já um avanço face aos trabalhos existentes pelo abandono de algumas simplificações presentes até então. Os autores propõem um modelo em que consideram alimentadores e cargas não uniformes. No entanto, sugerem uma outra simplificação que é a da normalização do alimentador. Estes autores consideram como funções objectivo a redução da potência de pico e das perdas de energia. Consideram-se condensadores com capacidade fixa e com custos a variar linearmente, bem como tensões constantes. Em três publicações de 1985, Grainger e Civanlar (1985), Civanlar e Grainger (1985a e 1985b), consideram já alimentadores com ramos laterais e o problema centra-se sobre o controlo da energia reactiva na rede, com a intenção de reduzir a potência de pico e manter a tensão dentro do intervalo requerido.

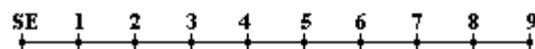


Figura 2. 1– Rede de 10 nós proposta em Grainger e Lee (1981).

Os autores propõem uma aplicação a uma rede simples de dez nós, Figura 2.1, com um único alimentador, que é utilizada por muitos trabalhos posteriores como “rede de teste”.

Baran e Wu (1989a e 1989b):

Este é dos trabalhos mais citados sobre o problema de localização de condensadores em redes radiais, pela forma como aborda o problema e o modelo que propõe, cujas equações são referidas e utilizadas em muitos trabalhos posteriores, e também por apresentar uma aplicação prática da metodologia proposta a uma rede, Figura 2. 2., que serve até hoje como “rede de teste” para muitos trabalhos publicados em revistas científicas sobre o tema.

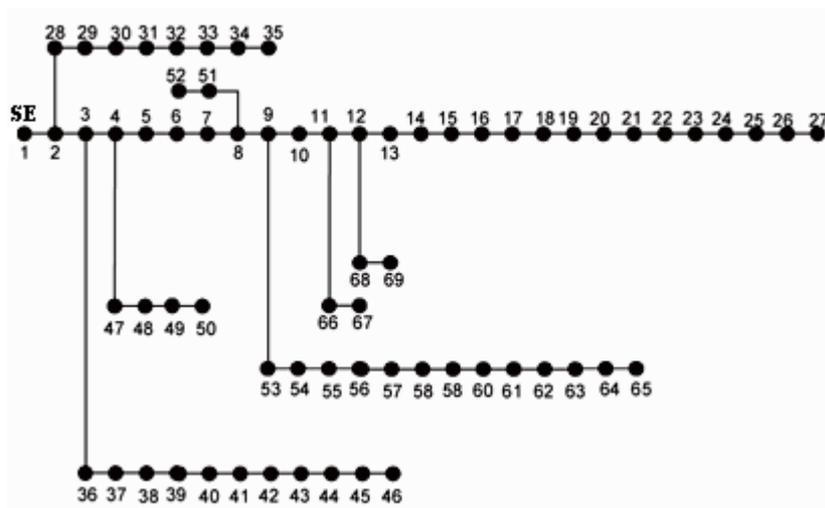


Figura 2. 2 - Rede 69 nós proposta pelo trabalho Baran e Wu (1989b).

O problema é considerado como de planeamento: determinar os locais de instalação, a dimensão e tipo de condensadores que devem ser colocados na rede de distribuição. Os objectivos são os de redução das perdas de energia, e a conservação da tensão nos níveis desejados, mantendo o custo da instalação dos condensadores num valor mínimo.

Os autores trabalham com a redução de perdas em energia (e não tanto com a redução das perdas em potência), utilizando uma curva de duração de carga, aproximada por intervalos discretos de tempo, durante os quais se assume que a carga se mantém constante. Para cada intervalo (que corresponde a um determinado nível de potência) ter-se-á um determinado trânsito de potência, restrições de tensão, restrições relativas às variáveis de controlo, i.e. a capacidade dos condensadores.

Para o trânsito de potência é proposto um algoritmo específico para redes radiais. O custo dos condensadores é aproximado por uma função com variação linear (o que não é real), com uma componente fixa.

Os autores formulam o problema como sendo não linear inteiro misto, considerando apenas uma função objectivo na qual se agrupam duas parcelas: uma relativa ao custo das perdas de energia e outra relativa ao custo da colocação de condensadores.

Os testes são feitos recorrendo a uma rede de distribuição radial muito simples com 9 nós, da referência Grainger e Lee (1981), e a outra de 69 nós proposta neste trabalho.

A partir de 2000

A partir do ano 2000, os trabalhos apresentados na literatura científica sobre o tema utilizam quase só metodologias que tiveram a sua expansão durante a década anterior:

- algoritmos evolucionários, como em Su e Lee (2002), Antunes et al. (2005), Augugliaro et al. (2006), entre outros;
- algoritmos genéticos, Levitin et al. (2000), Souza (2004), Pires e tal. (2006), entre muitos outros;
- colónias de formigas, Ghazi e Arabpour (2005), Gardel et al. (2006), entre outros;
- pesquisa tabu, Gallego et al. (2001), Pires e tal. (2005), entre outros;
- lógica difusa, Mekhamer et al. (2003), Balakumaran e Thanuskodi (2004), entre outros.

Abandona-se completamente a linearização do problema, e aparecem já muitos trabalhos em que os modelos propostos são MO, tal como em Abido e Bakhashwain (2003), Ramos et al. (2004), Gopalakrishnan et al. (2004), Thirunavukkarasu et al. (2004), Li et al. (2005), Jiang e Wang (2005), Pires et al. (2005), Ghazi e Arabpour (2005), Vlachogiannis e Lee (2005), Gardel et al. (2006), Augugliaro et al. (2006), Cuello-Reyna e Cedeno-Maldonado (2006), Dehkordi (2006), Krami et al. (2008), entre outros, muito embora o processo de resolução depois perca essa característica, uma vez que normalmente os objectivos são todos agregados, no início do processo, numa única função objectivo que é otimizada, não havendo, por isso, exploração e caracterização de uma fronteira não dominada.

Começam a surgir trabalhos que utilizam algoritmos evolucionários MO, Baran et al. (2001), Abido e Bakhashwain (2003), Abido e Bakhashwain (2005) e Abido (2006b), Begovic et al. (2004), Milosevic e Begovic (2004), Favuzza et al. (2006), Pires et al. (2007b), Antunes et al. (2009). Estes respeitam o modelo MO e apresentam como resultado a fronteira de *Pareto* com as soluções não dominadas do problema.

Como se pode ver, apesar de se apresentar apenas uma selecção dos trabalhos mais representativos, existe um número significativo de artigos publicados nestes últimos 8 anos que estudam o problema da colocação de condensadores em redes de distribuição de energia eléctrica.

Na secção seguinte é feito um resumo de alguns dos trabalhos que formulam o problema com um modelo MO, e que mais se aproximam da abordagem adoptada no presente trabalho para tratar o problema de planeamento da colocação e dimensionamento de condensadores em redes radiais de distribuição de energia eléctrica.

2.3 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJECTIVO APLICADOS AO PROBLEMA

Nos anos mais recentes os modelos matemáticos utilizados na resolução do problema da colocação de condensadores em redes de distribuição de energia eléctrica têm-se aproximado cada vez mais da realidade, respeitando o funcionamento do sistema, nomeadamente a sua topologia e características técnicas, as restrições existentes, e os objectivos em jogo para avaliar as soluções. Esta capacidade de aproximar os modelos à realidade também se deve à evolução dos próprios algoritmos disponíveis para resolver problemas que apresentam características que os tornam particularmente complexos e difíceis de resolver, como serem não lineares, de natureza combinatória, com variáveis contínuas e inteiras e com objectivos múltiplos para avaliação do mérito das soluções potenciais. Estes algoritmos permitem desenvolver ferramentas metodológicas e computacionais mais adequadas para o estudo deste problema e fornecer informação útil para auxiliar as decisões de planeamento.

De acordo com as publicações que têm surgido em revistas e conferências científicas nesta área, existem quatro grupos de autores que têm vindo a trabalhar nos últimos anos com o problema da colocação de condensadores e cujas metodologias de resolução propostas se baseiam em AEMO. De referir que alguns são direccionados para redes de grande dimensão e emalhasadas, afastando-se, por isso, do estudo proposto no presente trabalho. No caso das redes de transporte existem outras variáveis e outros equipamentos, nomeadamente os próprios geradores e transformadores, que se podem ajustar com o objectivo de atingir o despacho óptimo de energia reactiva na rede.

Ao restringir a pesquisa apenas a trabalhos que aplicam AEMO, o número de publicações encontradas decresce significativamente. Embora as aplicações deste tipo de algoritmos se estejam a generalizar, elas continuam ainda a ser uma novidade nesta área. Em Rivas-Dávalos et al. (2007), os autores fazem uma revisão bibliográfica sobre as aplicações de AEMO a sistemas de potência, e referem pouco mais de trinta trabalhos relativos a treze problemas tratados em Sistemas de Energia Eléctrica, a maior parte dos quais concentrados nos últimos quatro anos. Isto mostra a novidade deste tipo de algoritmos e o interesse que começaram a despertar recentemente nesta área de aplicação.

Por ordem cronológica resumem-se em seguida as publicações destes quatro grupo de autores que têm utilizado AEMO na resolução do problema.

Baran et al. (2001):

Baran et al. (2001), Ramos et al. (2004) e Vallejos et al. (2006) propõem uma abordagem baseada no Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) para tratar o problema da compensação de energia reactiva. Embora nestas publicações existam diferenças no número de objectivos considerados, a abordagem é a mesma. Em Baran et al. (2001), consideram-se quatro objectivos, um relativo ao investimento, outro às perdas activas e dois relativos aos desvios de tensão (médio e máximo). Em Ramos et al. (2004), os autores consideram três

objectivos: minimizar o investimento em equipamentos de compensação de energia reactiva, minimizar as perdas activas e maximizar a distância dos valores de tensão ao ponto crítico de instabilidade, de forma a manter uma margem de segurança. Em Vallejos et al. (2006) os autores consideram seis objectivos, acrescentando aos quatro da primeira referência, um objectivo relativo à distância dos valores de tensão ao ponto crítico de instabilidade e outro em que consideram a possibilidade da existência de compensadores estáticos.

Os autores utilizam sempre redes de transporte emalhasadas como redes de teste. Em Baran et al. (2001) e Ramos et al. (2004), a rede utilizada é uma rede de teste do IEEE de 118 barramentos. Em Vallejos et al. (2006) os autores utilizam uma rede de transmissão real do Paraguai, com 246 barramentos, em que parte funciona a 220 kV, outra a 66 kV e que liga a uma rede de distribuição de 23 kV.

Abido e Bakhashwain (2003):

Outro trabalho que utiliza o SPEA na resolução do problema do planeamento da energia reactiva na rede é o desenvolvido por Abido e Bakhashwain (2003), Abido e Bakhashwain (2005) e Abido (2006b). Nestes trabalhos os autores consideram dois objectivos, um referente à minimização de perdas activas na rede, e outro relativo à minimização do desvio da amplitude da tensão nos barramentos. Este trabalho é dedicado ao estudo do problema em redes de transporte com topologia emalhada. Por isso os testes e resultados também são sobre uma rede de teste do IEEE, de 30 nós, e na referência de 2006 os autores propõem uma outra rede de apenas 6 barramentos. Estes autores apresentam a frente de *Pareto* obtida, com as melhores soluções não dominadas encontradas para o problema, e em Abido (2006) aplicam ainda um algoritmo, baseado em lógica difusa, que escolhe automaticamente a melhor solução de compromisso encontrada.

Milosevic e Begovic (2004):

No trabalho descrito em Begovic et al. (2004), os autores usam o Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) para resolver o problema da colocação de condensadores em redes de distribuição, considerando um modelo com quatro funções objectivo. As funções objectivo consistem em minimizar o desvio de tensão nos barramentos do sistema, minimizar as perdas de potência activa nos alimentadores, minimizar a potência reactiva solicitada na subestação e minimizar o custo dos condensadores instalados. Neste trabalho existe um objectivo considerado mais importante que é a redução da tensão na subestação. Para o atingir os autores propõem uma metodologia de cálculo em vários passos descrita em Milosevic e Begovic (2004), em que as quatro funções objectivo não são todas optimizadas simultaneamente. A rede de teste utilizada é a da referência Baran e Wu (1989b), Figura 2. 2, com alterações no tipo de cargas, uma vez que o estudo subjacente a este trabalho, a redução da tensão na rede de distribuição, necessita que existam cargas dependentes do valor da tensão.

Favuzza et al. (2006):

Favuzza et al. (2006) e Augugliaro et al. (2006) aplicam o Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA – II) na resolução do problema. Em Favuzza et al. (2006), os testes da metodologia proposta são feitos sobre uma rede de distribuição com algumas sub-redes radiais, mas ligadas em malha entre si. Os objectivos considerados neste trabalho referem-se ao investimento, mas analisado globalmente numa função que integra parcelas relativas à diminuição de perdas e ao custo dos condensadores, e à tensão. Na referência Augugliaro et al. (2006), os testes são feitos sobre uma rede da referência, Das et al. (1994). Estes autores propõem ainda uma análise de robustez das soluções.

2.4 CONCLUSÃO

Pelo número de publicações científicas desde meados dos anos cinquenta, mas principalmente pela quantidade que se concentra nos últimos anos, podemos afirmar que este é um tema que continua actual, a despertar o interesse de empresas e investigadores, e que ainda carece de ferramentas de estudo que apoiem as decisões técnicas e económicas das empresas que exploram a rede de distribuição. Pode também considerar-se a dificuldade que existe em encontrar trabalhos com que seja possível estabelecer uma comparação de resultados, uma vez que existem muitas opções relativamente à abordagem do problema: uns autores consideram redes radiais e outros redes emalhadas, uns consideram condensadores fixos e outros condensadores de capacidade variável, uns centram-se sobre objectivos mais técnicos e outros sobre objectivos económicos, uns trabalham com redes de distribuição e outros com redes de transmissão.

A opção de fazer uma apresentação essencialmente em três períodos de tempo distintos deve-se às abordagens que maioritariamente foram sendo feitas ao problema e que caracterizam cada um destes três períodos. É interessante verificar que a evolução das abordagens algorítmicas permitiu ir tratando o problema de formas distintas, com maior ou menor grau de complexidade, e a sequência cronológica e de aplicações apresentada ilustra esta tendência.

3

ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

MULTI-OBJECTIVO

3.1 INTRODUÇÃO

O conceito de otimização existe na natureza, onde se encontram inúmeros exemplos de comportamentos otimizados e de adaptação óptima das espécies ao ambiente ou circunstâncias particulares. Existe também de forma inata em todas as pessoas, e esta realidade é visível quando pretendemos realizar tarefas de forma mais eficiente, mais rápida, com menores custos, com maiores lucros, gastando menos recursos, poluindo menos, etc. Por isso a otimização tem aplicação em todos os campos e estende-se desde tomadas de decisão mais simples até problemas complexos, em que existem vários objectivos a serem otimizados, muitas variáveis em jogo e/ou muitas restrições de diversos tipos.

Todos lidamos diariamente com problemas de otimização e esta é uma área de estudo em constante desenvolvimento. Por isso a Matemática desenvolveu, ao longo dos anos, vários métodos que auxiliam a resolução de problemas de otimização. Ultimamente estes métodos deixaram de utilizar apenas as operações matemáticas clássicas, para passarem a incorporar conhecimentos que se baseiam no comportamento humano, na inteligência humana e na Natureza.

Dentro destes métodos aqueles que têm surgido com grande interesse em problemas de otimização com as características do estudado neste trabalho são os Algoritmos Evolucionários (AE). Estes algoritmos utilizam técnicas de busca e otimização inspiradas nos mecanismos de evolução natural e na genética, e trabalham com diversas soluções em simultâneo, designadas em conjunto por população de indivíduos. A aplicação do algoritmo faz com que um conjunto de soluções, que não são à partida as de melhor qualidade, evoluam para que a sua adequação média ao ambiente, ou problema, melhore de geração em geração. A evolução é conseguida através dos processos conhecidos da natureza: o princípio da selecção natural, quando os indivíduos mais aptos têm mais hipótese de sobreviver e passar as suas características às próximas gerações; a reprodução, quando dois indivíduos combinam as

suas características para obterem um novo indivíduo, que pertence já à próxima geração e que se espera mais apto do que as soluções que o originaram, ou a mutação, quando alguns indivíduos alteram as suas características para se melhor se adaptarem a algum aspecto e melhorarem a sua aptidão.

Uma das maiores áreas de aplicação dos AEs é na resolução de problemas em que estão presentes vários objectivos em simultâneo. A maioria dos problemas reais apresenta com frequência decisões que envolvem diversos objectivos, ou múltiplas medidas de desempenho, que devem ser otimizados ao mesmo tempo. A experiência demonstra que existem sempre dificuldades na resolução destes problemas, pois alguns dos objectivos são conflituosos entre si e a optimização de um objectivo provoca a degradação do(s) outro(s) objectivo(s). Na maior parte dos casos as escalas e grandezas associadas aos vários objectivos nem sequer são possíveis de conciliar. Para estes problemas o mérito da solução não pode ser dado por um valor escalar, mas deverá ser expresso por um vector, em que cada elemento representa o valor do desempenho da solução num objectivo.

A capacidade dos AEs lidarem com problemas de optimização multi-objectivo (MO) tem vindo a ser confirmada nos últimos anos, dado que os AEs têm características que vêm ao encontro das particularidades deste tipo de problemas. Por isso tem-se vindo a assistir ao aparecimento de AEs já dedicados a problemas de optimização MO, os Algoritmos Evolucionários multi-objectivo (AEMO), dotados de técnicas para lidar com as especificidades dos problemas MO.

Este capítulo dedica-se sobretudo às especificidades dos modelos MO, às características dos AE e dos AEMO, e à descrição de alguns AEMO desenvolvidos e implementados com sucesso nos últimos anos.

3.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM PROBLEMAS MULTIOBJECTIVO

Existem diferenças fundamentais entre problemas mono-objectivo e problemas que apresentam múltiplos objectivos. É sobre as características específicas destes últimos que se centra esta secção deste capítulo.

De seguida descrevem-se brevemente as características fundamentais de um modelo MO, os conceitos que diferem entre optimização mono e multi-objectivo e quais os propósitos principais quando se buscam a(s) melhor(es) solução(ões) para o problema MO.

Existe muitas vezes a tendência de tentar adaptar um problema MO a mono-objectivo, quer na fase de elaboração do modelo, simplificando-o de forma a ter apenas um objectivo, quer na fase de resolução utilizando uma função que agrega todos os objectivos num só. No entanto, a complexidade de alguns problemas não permite, pelo menos sem que exista perda de informação, que um problema de optimização MO seja modelado ou resolvido como um problema de optimização mono-objectivo.

3.2.1 Optimização mono-objectivo

Num problema de optimização mono-objectivo existe apenas uma função objectivo que se pretende minimizar ou maximizar, e cujas soluções estão sujeitas a um conjunto de restrições (de igualdade, desigualdade e condições limite) que devem satisfazer para serem admissíveis para o problema.

Genericamente a sua formulação matemática pode ser descrita por:

$$\text{Minimizar/Maximizar} \quad f(\mathbf{x}) \quad 3.1$$

$$\text{sujeito a} \quad g_m(\mathbf{x}) \geq 0, m = 1, 2, \dots, M \quad 3.2$$

$$h_q(\mathbf{x}) = 0, q = 1, 2, \dots, Q \quad 3.3$$

$$\mathbf{x}_p^i \leq \mathbf{x}_p \leq \mathbf{x}_p^s, p = 1, 2, \dots, n \quad 3.4$$

Nesta formulação considerou-se uma função objectivo 3.1, M+Q restrições funcionais, M restrições de desigualdade 3.2, Q restrições de igualdade 3.3 e n variáveis de decisão, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ limitadas inferior e superiormente. Uma solução para o problema é representada pelo vector \mathbf{x} . O espaço das variáveis de decisão, espaço das decisões ou espaço das soluções é limitado pelos limites das variáveis de decisão 3.4.

Para que uma solução \mathbf{x} seja admissível para o problema, deve satisfazer as M+Q restrições funcionais, assim como todos os 2n limites das variáveis de decisão. Ao conjunto de todas as soluções admissíveis do problema d -se o nome de região admissível, X.

Na resolução de um problema de optimização mono-objectivo pretende-se determinar a solução admissível que optimiza a função objectivo. O seu valor   único, mesmo quando existam soluções óptimas alternativas.

Conforme as características da função objectivo, restrições e variáveis de decisão, podemos ter problemas de diversos tipos, que condicionam a escolha das metodologias de resolução a aplicar ao problema.

Resumidamente, o problema é linear se a função objectivo e todas as restrições do problema forem lineares em relação a \mathbf{x} . Será um problema não linear se a função objectivo ou alguma das restrições for não linear em relação a \mathbf{x} .

O problema é de optimização discreta ou combinatória quando as variáveis de decisão podem apenas assumir valores discretos, por exemplo valores inteiros ou apenas binários. Se as

variáveis de decisão puderem assumir valores reais, o problema é de otimização contínua. Se parte das variáveis de decisão são reais e outras são inteiras teremos um problema de otimização mista.

3.2.2 Otimização multiobjectivo

3.2.2.1 Funções objectivo e restrições

Os problemas de otimização MO apresentam várias funções objectivos, no mínimo duas, que na maior parte dos casos estão em conflito, e que se pretendem maximizar/minimizar em simultâneo. Apesar da formulação matemática ser muito semelhante a um problema mono-objectivo, as diferenças são notáveis, a começar pelo conceito de solução óptima que, como se verá a seguir, em otimização MO não é aplicável.

O problema de otimização MO pode ser formulado matematicamente da seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad \mathbf{f}_s(\mathbf{x}), s = 1, 2, \dots, S \quad 3.5$$

$$\text{sujeito a} \quad g_m(\mathbf{x}) \geq 0, m = 1, 2, \dots, M \quad 3.6$$

$$h_q(\mathbf{x}) = 0, q = 1, 2, \dots, Q \quad 3.7$$

$$x_p^i \leq x_p \leq x_p^s, p = 1, 2, \dots, n \quad 3.8$$

As funções objectivo, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_s(\mathbf{x}))^T$, $S \geq 2$, podem ser a minimizar ou a maximizar, a formulação anterior não implica perda de generalidade.

Para cada solução $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ no espaço das variáveis de decisão, existe um ponto gerado pelas funções objectivo, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_s)^T$, com $z_s = f_s(\mathbf{x})$ e $s = 1, \dots, S$. A este espaço multi-dimensional dá-se o nome de espaço das funções objectivo, ou espaço dos objectivos.

3.2.2.2 Características particulares

Existem algumas características que distinguem de forma clara a otimização MO. Podem referir-se: o conceito de solução não dominada, que substitui o de solução óptima; os conceitos de ponto ideal e *nadir*; a existência e utilização de dois espaços de pesquisa, o das variáveis de decisão e o das funções objectivo; as técnicas de resolução que poderão ser utilizadas. De seguida expõem-se cada uma destas características.

Em otimização MO a noção de solução óptima é substituída pela noção de solução não dominada ou óptima de Pareto. Uma solução não dominada é uma solução admissível para a qual não é possível melhorar simultaneamente todas as funções objectivo; i.e., a melhoria numa função objectivo apenas pode ser alcançada por degradação de pelo menos uma das outras. Ou seja, uma solução admissível é dominada por outra sempre que ao passar-se da primeira para a segunda, exista melhoria de pelo menos uma função objectivo, permanecendo inalteradas as restantes (Clímaco et al. 2003). Isto é, uma solução $\mathbf{x}_1 \in X$ domina uma solução

$\mathbf{x}_2 \in X$, se e só se \mathbf{x}_1 não é pior que \mathbf{x}_2 para todos os objectivos e \mathbf{x}_1 é estritamente melhor do que \mathbf{x}_2 para pelos um dos S objectivos do problema.

Em problemas de optimização MO, tal como já se referiu, não faz sentido falar em solução óptima global do problema, dado que as funções objectivo estão geralmente em conflito. Numa problemática de escolha de uma solução final para o problema, pretende-se, em geral, identificar no conjunto das soluções não dominadas uma solução de compromisso que melhor corresponda às preferências expressas pelo Agente de Decisão (AD). Noutros casos, o principal propósito será mesmo a caracterização da frente óptima de Pareto, ou fronteira de soluções não dominadas do problema, da forma mais exaustiva possível para que o AD possa seleccionar a solução mais adequada dentro das suas prioridades.

Em geral, o conceito de solução não dominada refere-se ao espaço dos objectivos, enquanto o de solução eficiente se refere ao espaço das variáveis de decisão. Assim, uma solução não dominada no espaço dos objectivos será a imagem da solução eficiente no espaço das variáveis de decisão.

A definição matemática de cada um destes conceitos, considerando todas as funções objectivo a minimizar, é a seguinte (Clímaco et al. 2003):

i) Uma solução $\mathbf{x}_1 \in X$ é eficiente se e só se não existe uma outra solução $\mathbf{x}_2 \in X$, tal que $\mathbf{z}_s(\mathbf{x}_2) \leq \mathbf{z}_s(\mathbf{x}_1)$ para todo o $s = 1, 2, \dots, S$, e $\mathbf{z}_s(\mathbf{x}_2) < \mathbf{z}_s(\mathbf{x}_1)$ para pelo menos um s .

ii) Um ponto no espaço dos objectivos $\mathbf{z}_1 \in Z$, com $\mathbf{z}_1 = (z_1(\mathbf{x}_1), z_2(\mathbf{x}_1), \dots, z_S(\mathbf{x}_1))^T$, diz-se não dominado se e só se \mathbf{x}_1 é uma solução eficiente.

Em optimização MO é por vezes conveniente definir dois pontos no espaço dos objectivos, o ponto ideal e o ponto *nadir*. Estes podem ser definidos da seguinte forma:

- ponto ideal \mathbf{z}^* é o ponto definido no espaço dos objectivos cujas componentes são o valor óptimo de cada função objectivo na região admissível quando optimizadas separadamente, $z_s^* = z_s(\mathbf{x}_s^*)$, em que \mathbf{x}_s^* é a solução eficiente que optimiza a função $z_s(\mathbf{x})$;

- ponto *nadir* \mathbf{z}^{nad} representa os piores valores de cada função objectivo na região eficiente. Face às dificuldades computacionais para determinar este ponto, é mais utilizado, como substituto do ponto \mathbf{z}^{nad} , o ponto definido pelos piores valores que cada função objectivo assume entre todas as soluções que optimizam individualmente cada função.

Embora cada z_s^* seja individualmente alcançável, o ponto ideal \mathbf{z}^* não corresponde a uma solução admissível, uma vez que os objectivos estão, geralmente, em conflito. No entanto, este ponto é utilizado em muitos algoritmos de optimização MO como solução de referência.

Em optimização mono-objectivo, o espaço multidimensional onde se desenvolve a pesquisa é o espaço das variáveis e as soluções são aceites ou não, conforme o valor que a função objectivo assume. Em optimização MO para além deste espaço, é necessário considerar também outro espaço multidimensional, o espaço dos objectivos. No entanto, soluções

próximas no espaço de decisão podem não apresentar esta característica no espaço dos objectivos; quando se pretende obter diversidade de soluções é necessário decidir em qual destes espaços se pretende essa característica. Determinado movimento no espaço das variáveis pode, no espaço dos objectivos, não corresponder a um movimento semelhante. Em optimização MO é necessário mapear o comportamento que o algoritmo apresenta no espaço de decisão para o espaço dos objectivos, apesar de a pesquisa ser sempre feita no espaço das variáveis de decisão. Em alguns algoritmos o comportamento apresentado no espaço dos objectivos é utilizado para guiar a pesquisa no espaço de decisão. Estes algoritmos coordenam a pesquisa nos dois espaços, para que a geração de novas soluções no espaço das variáveis se traduza nas características esperadas para as soluções no espaço dos objectivos.

Existem várias abordagens chamadas clássicas para a resolução de problemas MO utilizando uma função agregada dos vários objectivos do problema. Pretende-se, ao utilizar este tipo de função escalar substituta, agregar temporariamente as várias funções objectivo do problema numa única dimensão, de tal modo que a solução óptima da função escalar é não dominada do problema multi-objectivo original (Clímaco et al. 2003). As abordagens mais utilizadas consistem na utilização de somas pesadas, na selecção de uma das funções considerando as outras como restrições e na minimização da distância a um ponto de referência (por exemplo, a solução ideal).

Em todas estas abordagens é necessário definir parâmetros cujos valores têm impacto na solução final obtida: na soma pesada é criada uma função objectivo escalar onde se agregam os vários objectivos do problema através da sua soma ponderada; o segundo caso consiste em escolher uma única função objectivo a otimizar transformando os outros objectivos do problema em restrições através da especificação de níveis inferiores; as funções escalares baseadas na distância a um ponto de referência permitem obter soluções não dominadas do problema, minimizando a distância, segundo uma dada métrica, da região admissível a um qualquer ponto de referência no espaço dos objectivos.

A solução óptima encontrada para estes problemas escalares substitutos é específica para os parâmetros de conversão utilizados e depende da sensibilidade e conhecimentos prévios que o AD possa ter sobre o problema. Para cada definição de parâmetros apenas se encontra uma solução, que é óptima para o problema escalar substituto e não dominada para o problema MO. Assim, para calcular um conjunto de soluções da fronteira não dominada, ter-se-á que formular um conjunto de problemas mono-objectivo a partir do problema MO (através da modificação dos pesos, da função escolhida para otimizar, ou do ponto em relação ao qual se quer minimizar a distância) e resolvê-los usando um algoritmo apropriado (i.e., adaptado ao facto da função escalar substituta ser linear, não linear, etc.). Este processo pode ser feito em conjunto, o analista¹ com o AD, mas requer de ambas as partes um esforço e sensibilidade nem sempre possíveis.

¹ Devido à complexidade dos métodos utilizados, a comunicação entre o AD e o computador é geralmente mediada por um técnico, o analista (Clímaco et al. 2003).

Estas observações não significam que os métodos clássicos de optimização não apresentem muitas vantagens. Estes métodos continuam a ser utilizados com sucesso na resolução de muitos problemas MO reais, e reconhecem-se algumas vantagens na sua utilização, em particular a possibilidade de provar a convergência para a fronteira de Pareto para muitos tipos de problemas e a facilidade em dispor de implementações computacionais.

Existem, no entanto, algumas desvantagens: em cada iteração é apenas encontrada uma solução da frente de Pareto; em problemas de optimização MO não convexos nem todos os algoritmos clássicos conseguem encontrar as soluções da fronteira de Pareto; todos os algoritmos requerem algum conhecimento *a priori* do problema para definição de parâmetros (pesos, tipo de métrica utilizada, etc.); os parâmetros são normalmente difíceis de estabelecer porque em problemas reais é raro haver conhecimento profundo do problema e ainda menos da forma como os vários objectivos interagem entre si (Deb 2001).

Os métodos de resolução de problemas MO mais recentes, particularmente os que se baseiam em AEs, ultrapassam muitos dos inconvenientes das abordagens clássicas, e permitem a resolução de problemas, nomeadamente os de natureza não linear e combinatória, que as abordagens clássicas não conseguiam resolver, com um esforço computacional aceitável.

3.2.3 Utilização da frente de Pareto

Como foi referido na secção anterior, existem muitos conceitos e definições particulares em optimização MO. Como se trabalha com problemas em que os objectivos se encontram em conflito, não é possível obter uma solução óptima, mas um conjunto de soluções que constituem a frente óptima de Pareto. Nestas circunstâncias, ter como solução do problema um conjunto de soluções “óptimas” pode ser entendido no sentido de não se poder afirmar que, nesse conjunto, uma solução é melhor do que outra (i.e., o conceito de não dominância é o conceito chave em optimização MO, mas é um conceito “pobre” no sentido em que não permite discriminação entre essas soluções). A comparação entre soluções não dominadas poderá ser operacionalizada à custa da estrutura de preferências do AD, e a escolha de uma única solução ficará sempre vinculada às suas prioridades.

Consideremos um problema hipotético em que existem duas funções a minimizar – custo e perdas. Na Figura 3.1, ilustra-se um possível conjunto de soluções para o problema, destacam-se a frente óptima de Pareto e o posicionamento de outras soluções relativamente a esta.

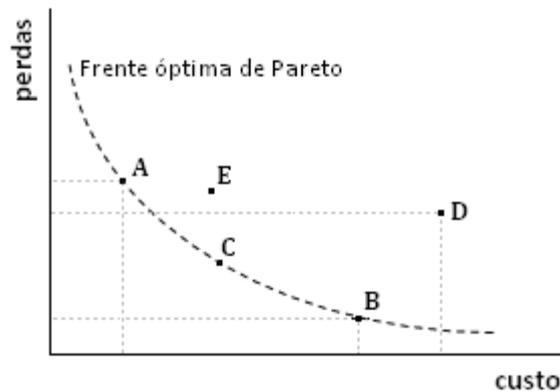


Figura 3.1– Exemplo ilustrativo de uma frente de Pareto.

Nesta frente destacaram-se algumas soluções: o ponto A que representa uma solução não dominada de custo inferior, mas que apresenta um valor de perdas superior; o ponto B que representa uma solução não dominada de custo mais elevado, mas cujo valor de perdas é baixo. Se ambos os factores são importantes, não se poderá dizer que a solução A é melhor que a B, nem o contrário. Cada uma destas soluções é melhor num objectivo mas pior no outro. Existem muitas outras soluções não dominadas na fronteira, por exemplo a solução C, que também não se pode afirmar que seja melhor que a solução A ou B, ou em relação a qualquer solução da frente de Pareto, mas cujos valores de *custo* e *perdas* estabelecem um outro compromisso entre os objectivos em consideração. Existem outras soluções, tal como os pontos D e E, que representam soluções dominadas do problema; isto é, existem soluções na frente de Pareto que são melhores do que D e do que E para ambas as funções objectivo.

É a partir do conjunto de soluções não dominadas do problema que o AD pode reconhecer os compromissos (“trade-offs”) que existem entre os objectivos, pois entre duas quaisquer soluções não dominadas à melhoria de pelo menos um dos objectivos encontra-se sempre associada uma perda em pelo menos um dos outros objectivos. Uma solução de compromisso aceitável para o problema MO deverá ser escolhida deste conjunto.

Assim como existem, em problemas mono-objectivo, soluções óptimas globais e óptimos locais, em optimização MO também podemos definir frentes óptimas de Pareto globais e locais. A frente óptima de Pareto global, ou simplesmente frente de Pareto, é o nome que se dá ao conjunto de soluções não dominadas de toda a região admissível. Uma vez que as soluções que pertencem a este conjunto são não dominadas em relação a qualquer solução da região admissível, elas são as melhores soluções de compromisso para o problema de optimização MO.

Uma frente óptima de Pareto local pode ser definida (Deb, 1999) da seguinte forma:

- se para cada solução \mathbf{x} de um conjunto P não existe qualquer solução \mathbf{y} na vizinhança de \mathbf{x} , tal que $\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\|_{\infty} \leq \varepsilon$, em que ε é um número positivo muito pequeno, que domine qualquer membro do conjunto P, então as soluções que pertencem ao conjunto P constituem o conjunto óptimo de Pareto local;

- se não existe nenhuma solução no espaço de pesquisa que domine qualquer solução que pertença ao conjunto P , então as soluções desse conjunto constituem a conjunto ótimo de Pareto local.

Em otimização MO existem, portanto, dois fins principais: guiar a pesquisa para a região ótima de Pareto global e assegurar a diversidade da população desta frente de forma a caracterizá-la da forma mais completa possível, no sentido de ter soluções representativas de diferentes compromissos a estabelecer entre os objectivos.

Embora a primeira finalidade seja comum a qualquer algoritmo de otimização, a segunda é específica de problemas MO. Uma vez que nenhuma solução da frente de Pareto pode ser considerada melhor do que outra, interessa que o algoritmo encontre o maior número possível de soluções bem diversas, que possibilitem uma boa caracterização da frente de Pareto.

Muitos dos algoritmos de otimização MO que trabalham com uma população de soluções fazem uso da frente de soluções não dominadas ou utilizam a classificação de diversas frentes para poderem qualificar soluções.

A frente não dominada pode ser determinada a partir de uma dada população de soluções, através de diversos métodos, sendo a diferença fundamental associada à complexidade computacional de cada um. Um dos métodos resume-se a comparar cada solução x de uma população com todas as outras soluções dessa população, verificando se x é dominada por alguma delas. Outro método consiste em manter um conjunto X' , inicialmente vazio, em que se insere uma primeira solução da população X . Depois, cada solução é retirada, à vez, de X e comparada com as já existentes em X' . No caso de haver soluções X' que sejam dominadas pela nova solução, elas são retiradas, e x é inserida em X' . Se x é dominada por alguma solução de X' então x é ignorada. No final, as soluções que pertencerem ao conjunto X' constituem o conjunto de soluções não dominadas do problema.

Com a classificação anterior ficamos apenas com dois conjuntos, um que contém as soluções não dominadas da população e outro que contém as soluções dominadas sem qualquer outra qualificação. Existem algoritmos que apenas consideram estes dois conjuntos ou frentes. No entanto, a partir desse último conjunto podem ainda determinar-se outras “frentes não dominadas”.

As frentes não dominadas permitem ordenar a população por níveis de dominância e são utilizadas por vários algoritmos de otimização MO, como se verá na secção 3.5 *Algoritmos Evolucionários multi-objectivo*.

No primeiro nível encontram-se as melhores soluções e no último nível estão as piores soluções em termos da relação de não dominância. Uma solução que pertença a um determinado nível é dominada por pelo menos uma solução do nível inferior àquele a que ela pertence.

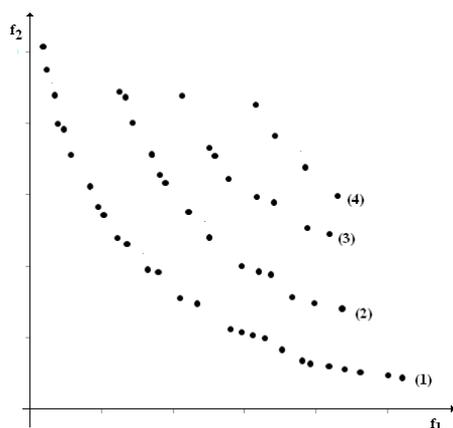


Figura 3.2 – Exemplo de ordenação por frentes não dominadas.

Por exemplo na Figura 3.2, em que f_1 e f_2 são funções a minimizar, as soluções na fronteira (1) são as soluções não dominadas. Depois aparecem por ordem crescente (2 a 4) vários níveis de não dominância. As soluções dos níveis mais baixos apresentam sempre soluções mais interessantes do ponto de vista dos objectivos do problema.

Existem vários algoritmos, nomeadamente os algoritmos elitistas que serão abordados posteriormente, que utilizam os níveis de dominância no processo de selecção de soluções. As várias frentes são determinadas de formas diferentes, conforme o algoritmo, dependendo do espaço de armazenamento de dados, complexidade do método e velocidade de execução deste.

Um dos processos consiste em ir retirando sucessivamente da população as soluções pertencentes a cada uma das frentes. Primeiro a frente de nível 1, i.e. o conjunto de soluções não dominadas da população, depois a de nível 2, e sucessivamente cada uma das frentes até todas as soluções da população estarem inseridas numa frente. No final tem-se essa mesma população, mas ordenada por níveis de não dominância.

O processo para determinar as soluções de cada nível, depois de já se ter retirado o conjunto de soluções não dominadas do problema, faz-se da seguinte forma: ignoram-se todas as soluções das frentes dos níveis anteriores (podem ser retiradas temporariamente da população); determinam-se as soluções não dominadas entre as restantes soluções; este conjunto constitui a nova frente não dominada. Estes passos terão que ser repetidos até todas as soluções pertencerem a uma frente não dominada.

Outro processo também utilizado em algoritmos de optimização MO consiste em determinar inicialmente, para cada solução x_i um contador n_i com o número de soluções que dominam x_i , e um conjunto P_i com as soluções que são dominadas por x_i . Esta fase inicial permite encontrar logo as soluções não dominadas do problema, que serão as da frente de nível 1. Todas as soluções da primeira frente têm o contador a zero no final deste primeiro passo. De seguida, analisam-se os respectivos conjuntos P_i e a todos os contadores das soluções que pertencem a este conjunto é subtraída uma unidade. As soluções cujos contadores se tornaram nulos pertencem à frente de nível 2 e podem ser transferidas para o mesmo conjunto onde se

armazenam as soluções com nível de não dominância 2. Este processo repete-se até que todas as soluções estejam ordenadas pelos respectivos níveis de dominância.

Existem algoritmos que, em determinadas fases de pesquisa, permitem que permaneçam soluções não admissíveis na população. Neste caso, estas soluções são tratadas separadamente fazendo parte de um conjunto distinto. Este conjunto independente também poderá ser ordenado por níveis de dominância.

3.3 PRINCIPAIS MÉTODOS EM OPTMIZAÇÃO MO

Nesta secção é apresentado um resumo sobre os principais métodos desenvolvidos para a resolução de problemas MO. Estes métodos são muitas vezes divididos na literatura entre métodos clássicos de programação matemática e meta-heurísticas (onde se incluem os algoritmos evolucionários). Dentro deste último grupo, assistiu-se nos anos mais recentes a um aumento crescente de algoritmos e também de aplicações com sucesso a problemas considerados de elevada complexidade.

3.3.1 Métodos Clássicos

Existem diversas classificações possíveis no que respeita aos algoritmos de optimização MO. Uma das sistematizações é a proposta por Clímaco et al. (2003), estabelecida com base em: grau de intervenção do AD, tipo de modelação das preferências do AD, número de ADs, certeza/incerteza na determinação dos coeficientes do modelo, e informação requerida e resultados obtidos.

A classificação mais utilizada na literatura é a baseada no grau de intervenção do AD, e neste grupo pode ter-se, segundo a classificação proposta por Clímaco et al. (2003):

- articulação *a priori* das preferências do AD, em que uma vez escolhido o método a agregação de preferências fica definida à partida. Por exemplo, o método da distância mínima à solução ideal; o método em que se utiliza uma função utilidade, construída a partir das funções objectivo do problema original; programação por metas e o método lexicográfico.

- Articulação progressiva de preferências do AD. Este é o caso dos métodos interactivos em que há uma sequência de fases de cálculo de soluções eficientes e de fases de diálogo, que servem para preparar o cálculo de novas soluções eficientes, com base nas indicações do AD.

- Articulação *a posteriori* de preferências, em que se usam métodos geradores de todo o conjunto de soluções eficientes, sendo a agregação de preferências do AD feita após este cálculo exaustivo.

Uma explicação mais pormenorizada sobre alguns destes métodos encontra-se em Clímaco et al. (2003).

Estes métodos são sobretudo eficazes quando utilizados em problemas lineares ou não lineares com certas características, com um espaço de soluções restrito e bem definido. Em problemas combinatórios complexos, geralmente não lineares, com um número elevado de funções objectivo e restrições, a sua aplicação torna-se pouco eficaz ou é mesmo impossível. Por isso, nesses casos recorre-se a outro tipo de métodos mais flexíveis e adaptáveis a problemas com essas características.

3.3.2 Meta-heurísticas

Neste ponto são brevemente descritas e caracterizadas abordagens heurísticas e meta-heurísticas, bem como algumas das suas principais aplicações. Os algoritmos evolucionários, embora sejam classificados como meta-heurística terão uma secção específica, uma vez que são eles que sustentam a resolução do problema em estudo neste trabalho.

As heurísticas surgiram para resolver problemas com determinadas particularidades, nos quais a aplicação de métodos de programação matemática não era exequível, em particular problemas de natureza fortemente combinatória e/ou não linear. Estas abordagens, ao serem muito dedicadas às características de problemas particulares, têm um grau de aplicabilidade limitado, diminuindo significativamente a respectiva performance quando há alterações de elementos do modelo para que foram desenvolvidas. As meta-heurísticas surgem exactamente da necessidade de desacoplar a técnica de resolução em relação ao problema tratado. Sörensen (2003) define meta-heurística como um esquema algorítmico geral com possibilidade de ser aplicado a diferentes problemas de optimização, com relativamente poucas alterações para que se adapte a um problema particular. As meta-heurísticas são, então, técnicas de nível superior que fornecem orientações na operação de técnicas de resolução adaptadas a problemas concretos.

Existem várias definições para o conceito de meta-heurísticas. Uma das primeiras foi introduzida por Glover (1986), em simultâneo com a meta-heurística *pesquisa tabu*: uma meta-heurística é um processo iterativo de geração de soluções, que utiliza uma ou mais heurísticas subordinadas, e que combina diferentes formas de exploração da região de pesquisa.

Existe alguma relutância em considerar estes métodos como competitivos com os clássicos, por causa da sua dificuldade em garantir quer a admissibilidade, quer a optimalidade das soluções e, até mesmo, em muitos casos, determinar quão distante está uma solução admissível da solução óptima (Reeves 1995). No entanto, a sua aplicação é útil em muitas circunstâncias, quando não se podem aplicar métodos exactos de programação matemática ou, mesmo que estes se possam aplicar, o esforço computacional é demasiado elevado, ou ainda quando os dados do problema são incompletos ou incertos. Em algumas circunstâncias as meta-heurísticas são aplicadas para que o AD tenha em pouco tempo, e com reduzido esforço computacional, um conjunto de soluções que caracterizam devidamente o espaço de pesquisa, de onde pode ser escolhida uma como solução final.

As meta-heurísticas podem dividir-se em três grandes classes (Sörensen, 2003), dependendo das técnicas de exploração do espaço de pesquisa. Referem-se brevemente as características de cada uma delas.

As meta-heurísticas baseadas na vizinhança ou meta-heurísticas de pesquisa local distinguem-se por utilizarem uma operação designada por *movimento* para, iterativamente, se deslocarem de uma solução para outra. A vizinhança $V(x)$ de uma solução x é dada pelo conjunto de soluções que podem ser atingidas pelo *movimento* a partir dessa solução. Alguns exemplos de meta-heurísticas baseadas na vizinhança são: a pesquisa tabu (*tabu search*) (Glover 1996), o arrefecimento simulado (*simulated annealing*) (Kirkpatrick et al., 1993) e o GRASP (*greedy randomized adaptative search procedure*) (Feo e Resende, 1989).

Outro grupo é constituído pelas meta-heurísticas baseadas em populações que, tal como o nome indica, mantêm um conjunto (população) de soluções. Neste caso, a pesquisa de novas e melhores soluções para o problema é feita através da combinação de soluções da população. Estas combinações realizam-se até que seja satisfeito um determinado critério de paragem. Como exemplos podemos referir: os algoritmos evolucionários (*evolutionary algorithms*), (Rechenberg, 1973), as colónias de formigas (*ant colony*), (Dorigo et al. 1996) e a pesquisa por dispersão (*scatter search*), (Glover et al., 2000).

Podem ainda considerar-se as meta-heurísticas híbridas, que no mesmo processo de pesquisa utilizam técnicas das meta-heurísticas baseadas na vizinhança e em populações. Alguns trabalhos já publicados utilizam estas combinações: algoritmos genéticos com pesquisa local (Prins, 2003), algoritmos genéticos com arrefecimento simulado (Mahfoud e Goldeberg, 1995), e algoritmos genéticos com pesquisa local e pesquisa tabu (Fleurent e Ferland, 1993).

3.4 CARACTERÍSTICAS DOS ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS

O termo Algoritmos Evolucionários é utilizado para designar procedimentos meta-heurísticos que utilizam na sua implementação modelos computacionais baseados em processos evolutivos biológicos. Os AEs inspiram-se nos princípios de evolução natural para desenharem as suas próprias estratégias de busca, aprendizagem, aperfeiçoamento e optimização. A sua grande flexibilidade na resolução de problemas faz com que cada vez mais sejam aplicados a problemas complexos, nos quais não é fácil ou sequer possível, pelas suas características, a utilização de algoritmos de optimização clássicos. Os AEs desenvolvem a procura trabalhando com uma população ou conjunto de soluções, como se descreverá a seguir, não fazendo qualquer exigência ao nível da continuidade, convexidade ou diferenciabilidade das funções ou espaços de pesquisa. Devido a estas características, verifica-se a crescente aplicação destes algoritmos a um vasto conjunto de problemas e a confirmação da sua capacidade de resposta à exigência dos problemas complexos, principalmente os de natureza combinatória.

Em termos genéricos, sem detalhar as técnicas específicas utilizadas pelos vários AEs em particular, a estrutura de um AE segue as seguintes fases.

- O processo evolucionário é iniciado com a geração de uma primeira população de soluções (população inicial).

- As soluções são avaliadas segundo uma função de aptidão, com a finalidade de lhe associar um determinado valor (valor de aptidão ou *fitness*), que permite medir a qualidade da solução para o problema em estudo e assim orientar a pesquisa de novas soluções.

- Aplica-se depois a todos ou parte dos indivíduos da população (a inicial ou outra) um conjunto de operadores com a finalidade de criar uma nova população. Estes operadores são:

- A *selecção* permite seleccionar soluções da população principal para uma população provisória, e as soluções com maior valor de aptidão terão maior probabilidade de integrarem esta população.
- O *cruzamento* ou *recombinação* (*crossover*) é um operador genético que é aplicado sobre as soluções da população provisória, e que consiste em combinar as características de duas, ou mais, soluções (progenitores) para criar uma ou mais soluções (descendentes).
- A *mutação* é um operador genético que introduz alterações nas soluções que, em princípio, já tinham sofrido cruzamento. Estes dois operadores permitem criar uma nova população.
- A *substituição* permite substituir algumas soluções da população principal pelas soluções modificadas. As soluções com maior aptidão terão maior probabilidade de permanecer na população principal, e as que apresentarem pior aptidão terão maior probabilidade de serem removidas.

Estas operações têm características diferentes de acordo com o AE utilizado.

Este processo termina quando se atingir alguma condição de paragem, normalmente o número máximo de gerações ou a ausência de melhoria entre gerações consecutivas.

Dentro dos AEs podemos encontrar descrito na literatura um grande número abordagens semelhantes, que se distinguem através de algumas particularidades nas estratégias de evolução propostas e/ou na forma como são aplicados os operadores descritos. No entanto, por causa das suas características, as mais utilizadas e referenciadas são as Estratégias Evolucionárias (EEs) (Rechenberg, 1973; Schwefel, 1981) e os Algoritmos Genéticos (AGs) (Holland, 1975).

Não é objectivo deste capítulo descrever pormenorizadamente cada uma destas estratégias, mas fazer apenas uma introdução aos AEs. Com esse propósito descrever-se-ão brevemente os AEs, com a intenção de introduzir os principais conceitos que sustentam estas abordagens.

3.3.1 Estratégias Evolucionárias

As EEs foram desenvolvidas inicialmente por Rechenberg (1973) com o objectivo de resolver problemas de optimização, tendo por base as estruturas genéticas e processos de optimização naturais. Este trabalho foi continuado posteriormente por Schwefel (1981), que desenvolveu novos esquemas evolucionários com base nos mesmos princípios. As EEs são algoritmos de optimização robustos e eficientes, não exigindo nenhuma condição relativa à continuidade e convexidade do espaço de pesquisa, como acontece em outros algoritmos de optimização (Schwefel, 1995).

Estes algoritmos trabalham directamente com a representação real das variáveis de decisão. Assim, cada indivíduo é um vector de números reais (variáveis de decisão) e representa uma potencial solução para o problema de optimização. As EEs necessitam apenas de informação sobre a função objectivo e as restrições.

As EE utilizam um tipo de nomenclatura específica (Bäck et al., 1991). Esta é baseada no número de progenitores, no número de descendentes e no tipo de selecção considerado. O número de progenitores é designado por μ e o número de descendentes λ . Os tipos de selecção foram descritos originalmente por: '+' e ','.

Na primeira versão desta técnica, desenvolvida por Rechenberg, a selecção é feita sobre uma população de dois membros, ou seja $\mu + \lambda = 1 + 1 = 2$, a designação, na nomenclatura apresentada é EE-(1+1). O mesmo autor desenvolveu posteriormente estratégias mais complexas, onde a selecção é feita sobre uma população de $\mu > 1$ indivíduos e um descendente, designada por EE-($\mu + 1$).

Mais tarde surgiram outras variantes destas técnicas, designadas por EE-($\mu + \lambda$) e EE-(μ, λ). Nestes casos são gerados, por mutação, λ descendentes a partir de μ progenitores. Os esquemas de selecção para escolher as μ melhores soluções para a geração seguinte são diferentes: no método EE-($\mu + \lambda$) as soluções da população para a geração seguinte são escolhidas entre as μ progenitoras e as λ descendentes; no método EE-(μ, λ) as soluções são escolhidas unicamente das λ descendentes, assumindo que $\lambda > \mu$.

Apesar das EEs originais necessitarem apenas de um operador genético (mutação) para gerarem novos indivíduos, foi introduzido posteriormente o operador cruzamento, aplicado conjuntamente com mutação (Schwefel, 1995).

3.3.2 Algoritmos Genéticos

Os AGs são inspirados nos processos de selecção natural e na genética, utilizando um modelo computacional de pesquisa probabilística. Foram propostos por John Holland (Holland, 1975),

têm sido aplicados com êxito desde essa altura a inúmeros e variados problemas e existem referências incontáveis quer sobre a abordagem em si, quer sobre as suas aplicações.

Nos AGs cada indivíduo representa uma solução potencial para o problema e é avaliado de acordo com o seu desempenho em relação ao(s) objectivo(s) do problema. É com base no resultado desta avaliação que se aplicam os operadores genéticos que pesquisam os espaço de soluções e irão dar origem aos indivíduos da próxima geração. Os AGs aplicam o conceito da evolução natural da sobrevivência dos mais aptos, i.e. os indivíduos competem entre si pela sobrevivência. Estes algoritmos trabalham com uma população de indivíduos - i.e., um conjunto de potenciais soluções - que após serem avaliados concorrem entre si para serem seleccionados para progenitores e gerarem os indivíduos da próxima geração, os descendentes. A nova geração é criada através de procedimentos que pretendem replicar os mecanismos genéticos. Através do cruzamento dos progenitores obtêm-se novos indivíduos que mantêm algumas características dos seus antecessores, i.e. os descendentes são sempre uma combinação genética dos pais. Através da mutação introduz-se novo material genético nos descendentes e possibilita-se o surgimento de características verdadeiramente inovadoras nas novas gerações.

Tal como acontece na natureza, pretende-se que com o evoluir das gerações a população de soluções apresente cada vez melhores indivíduos relativamente ao(s) objectivo(s) do problema de optimização. Os mecanismos de procura genética conduzem à evolução da população, e os indivíduos que apresentem um melhor desempenho têm tendência a sobreviver. Isto faz com que, ao longo das gerações, a qualidade média da população face ao problema melhore, tal como acontece na selecção natural, em que os indivíduos adaptam as suas características para fazer frente às condições ambientais em que se encontrem.

Considerando então uma população principal P de n indivíduos, um AG simples pode ser descrito pelas seguintes etapas:

```
INÍCIO
t= 0;
Inicializa aleatoriamente P(t)
Avalia P(t)
Repete:
  Selecciona P'(t)
  Recombina P'(t)
  Muta P'(t)
  Substitui P(t)
  t=t+1
Até verificar condição de paragem
FIM
```

Uma vez que a população de indivíduos representa o conjunto de soluções para o problema, o sistema natural de evolução da população equivale ao processo de pesquisa de potenciais soluções para o problema. Este processo iterativo, que permite a evolução da população, repete-se até que seja atingida uma determinada condição de paragem: número máximo de

iterações/gerações, a estagnação da evolução da população em termos de qualidade, entre outras.

Em cada iteração a população é avaliada e os indivíduos da população são seleccionados probabilisticamente segundo o seu desempenho. Esta é uma medida da adaptação do indivíduo ao meio ambiente, i.e. da potencialidade da solução para satisfazer o(s) objectivo(s) do problema. Deste modo, o procedimento de avaliação de cada indivíduo presente na população: obriga à sua descodificação para identificação da solução que lhe corresponde e supõe a identificação do ponto no espaço dos objectivos que representa o mérito do indivíduo nos vários aspectos de avaliação.

Os indivíduos seleccionados são recombinados através de operadores de cruzamento e são alterados através de operadores de mutação, para produzirem a nova geração.

Nesta breve descrição do algoritmo encontram-se mencionadas várias etapas que comportam a especificação e implementação de um AG. Os principais conceitos subjacentes a estas etapas serão abordados seguidamente, tais como: codificação ou representação das soluções, aptidão, população, mecanismos de selecção, operadores genéticos cruzamento e mutação, mecanismos de substituição, critérios de paragem, diversidade da população e elitismo.

3.3.2.1 Representação das soluções

Quando se pretende aplicar um AG o primeiro passo é o de criar uma ligação entre o contexto do problema original e o espaço de resolução onde se desenrola o processo evolucionário. A *representação* é o passo que permite estabelecer a correspondência entre o espaço de soluções do problema original (espaço dos fenótipos) e um conjunto de indivíduos (no espaço dos genótipos).

Assim como se define a codificação ou representação de soluções, pode definir-se a correspondência oposta: descodificação (Eiben e Smith, 2003). A descodificação é então a correspondência inversa do genótipo para o fenótipo. Cada indivíduo terá no máximo uma solução correspondente.

A representação utilizada com mais frequência, e que corresponde à ideia original de Holland, utiliza o alfabeto binário para codificar os valores de cada variável do indivíduo, quer na sua versão tradicional, quer numa versão designada por código *Gray*. Este código permite que valores adjacentes da variável de decisão difiram apenas de um dígito binário numa determinada posição. Existem estudos (Bäck, 1996) que demonstram a superioridade da utilização, em AG, do código *Gray* face ao código binário padrão.

Apesar da representação clássica utilizar apenas o alfabeto binário, nada impede, no entanto, a representação através de números reais, números inteiros e até caracteres, uma vez que em algumas circunstâncias outro tipo de representação, diferente da binária, traz vantagens em termos de adequação ao problema, de precisão ou de diminuição do esforço computacional.

3.3.2.2 Avaliação de soluções

A avaliação de soluções consiste na associação de valores aos indivíduos de uma população correspondentes à sua utilidade na resolução de um problema. Esta associação faz-se recorrendo a uma função de avaliação (aptidão).

A função de avaliação associa um valor de aptidão a cada indivíduo (genótipo). Esta função devolve, para cada indivíduo, um valor numérico que reflecte o respectivo mérito. Normalmente as noções de avaliação e de aptidão confundem-se, mas há casos em que isso não acontece. Enquanto a função de avaliação fornece uma medida de desempenho relativamente a um conjunto específico de parâmetros, sendo a avaliação de um indivíduo independente das avaliações dos outros, a função de aptidão faz corresponder essa medida de desempenho à atribuição de oportunidades de reprodução, sendo dependente dos outros indivíduos da população.

3.3.2.3 População

Um dos aspectos mais importantes nos AGs é o tamanho da população, uma vez que este afecta quer a qualidade das soluções obtidas, quer o tempo de processamento do algoritmo. Podem existir populações de qualquer tamanho, mas uma vez este definido é normal que se mantenha constante durante todo o processo evolucionário.

As populações pequenas têm a vantagem de ter menos exigências computacionais, mas apresentam, em geral, pouca diversidade genética por parte dos seus elementos, o que pode levar à convergência prematura e a fraca qualidade das soluções obtidas. As populações grandes, por seu lado, ultrapassam o inconveniente da falta diversidade, e permitem prevenir a convergência prematura, mas revelam-se muito exigentes a nível computacional, elevando o tempo de processamento do algoritmo.

3.3.2.4 Selecção

A selecção é efectuada nos AGs com a finalidade de determinar os indivíduos da população que serão os progenitores da geração seguinte, através dos mecanismos de cruzamento, e também com a finalidade de escolher que indivíduos (descendentes) devem sobreviver para a próxima geração. Nos AGs a selecção é probabilística, feita de acordo com os valores de aptidão dos indivíduos, de tal forma que os melhores têm mais probabilidade de serem seleccionados, i.e., os mecanismos de selecção baseiam-se no princípio de Darwin de sobrevivência dos mais aptos.

Os mecanismos de selecção dos indivíduos podem ser baseados na proporção dos valores de aptidão e baseados na ordenação dos valores de aptidão.

Na selecção baseada na proporção, a selecção de um indivíduo baseia-se no seu próprio valor de aptidão e na relação com os valores de aptidão dos outros indivíduos da população. No caso da selecção baseada na ordenação, a selecção é feita considerando apenas a posição do indivíduo na população ordenada, sem levar em conta o seu próprio valor de aptidão.

Dentro dos mecanismos de selecção baseados na ordenação podem distinguir-se o método da roleta e a amostra universal estocástica, uma vez que estes são dos mais utilizados.

O método da roleta (Goldberg, 1989) é um mecanismo de selecção estocástico. Neste método, associa-se a cada indivíduo uma fatia da roleta, proporcional à medida de desempenho que lhe foi atribuída. Deste modo, os indivíduos que apresentam maior aptidão têm maiores probabilidades de serem escolhidos. Fazem-se vários lançamentos da roleta, através da geração de um número aleatório, e os indivíduos associados às porções atingidas nestes lançamentos, i.e. cuja fatia inclui esse número, são seleccionados. Este método apresenta algumas desvantagens: redução da diversidade e convergência prematura, uma vez que os mais aptos podem ser seleccionados muitas vezes, e estagnação da população.

Na selecção por amostragem universal estocástica (Goldberg, 1989) os indivíduos são associados a porções iguais e contíguas de uma roleta. O método é semelhante ao da roleta, e a diferença consiste em as porções serem todas iguais, ou seja, neste caso todos os indivíduos têm a mesma probabilidade de serem escolhidos.

Em relação às técnicas de selecção baseadas na ordenação, podem distinguir-se a selecção por torneio e a selecção por truncatura.

Na selecção por torneio (Goldberg, 1989) escolhe-se aleatoriamente um certo número de indivíduos da população, e o indivíduo que, dentro destes, tiver melhor valor de aptidão é o vencedor do torneio. O torneio é repetido tantas vezes quanto o número de indivíduos a escolher, normalmente o tamanho a população. Este método evita a convergência prematura (desde que a dimensão dos torneios seja pequena), impede a estagnação da população, é de fácil implementação e não requer grande esforço computacional. Este é talvez o mecanismo mais utilizado para fazer a selecção.

No mecanismo de selecção por truncatura, os indivíduos são ordenados segundo os seus valores de aptidão. Depois são seleccionados aqueles indivíduos cujos valores de aptidão sejam maiores do que um limiar predefinido. Neste caso só são seleccionados os melhores indivíduos.

3.3.2.5 Recombinação

A recombinação (ou cruzamento) é o operador genético que permite produzir novos indivíduos (descendentes) a partir da informação dos progenitores. Num AG pretende-se que o resultado do cruzamento entre indivíduos (progenitores) com bons valores de aptidão gere novos indivíduos (descendentes) com qualidade superior, i.e. mais aptos relativamente ao problema de optimização em questão. Deste processo de evolução depende o sucesso do AG.

Existem diversos mecanismos de cruzamento, referindo-se seguidamente os mais utilizados (Baker 1985).

No cruzamento com um ponto de corte, também chamado de cruzamento simples, determina-se de forma aleatória um ponto de cruzamento. A troca de informação a partir desse ponto

entre os indivíduos progenitores produz dois descendentes. Na Figura 3.3 exemplifica-se a aplicação deste tipo de cruzamento considerando um ponto de cruzamento na posição 4.

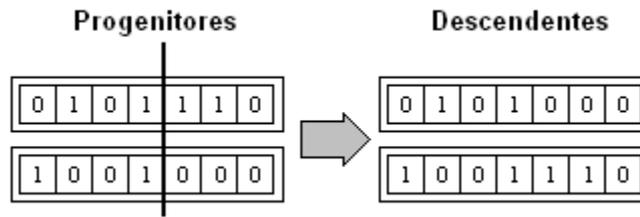


Figura 3. 3– Cruzamento com um ponto de corte.

No cruzamento com vários pontos de corte determinam-se de forma aleatória i pontos de cruzamento. Um dos descendentes recebe as sequências de genes de índice ímpar de um dos descendentes e as de índice par do outro. O outro descendente recebe as contrárias. Na figura 3.4 ilustra-se a aplicação deste operador para o caso $i = 2$, com um ponto de cruzamento na posição 1 e outro na posição 4.

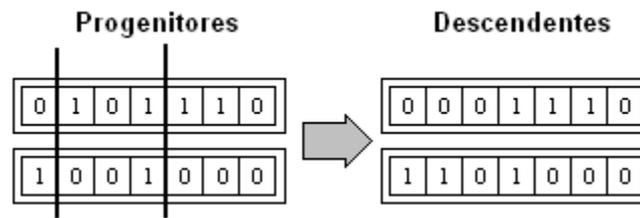


Figura 3. 4– Cruzamento vários pontos de corte, $i = 2$.

O cruzamento uniforme consiste na utilização de uma máscara binária, de comprimento igual ao dos indivíduos, gerada aleatoriamente. De seguida um dos descendentes herda os genes de um dos progenitores para as posições da máscara com valor 1, e do outro progenitor para as posições da máscara com valor 0. O mesmo acontece com o outro descendente, mas com os valores da máscara trocados. Na figura 3.5 ilustra-se este tipo de cruzamento.

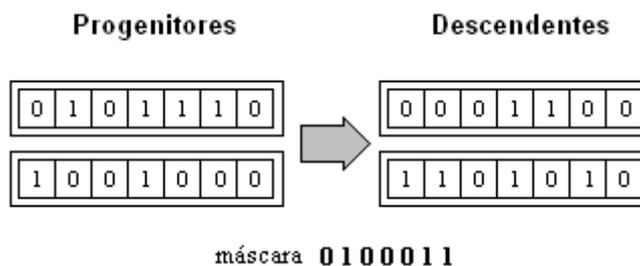


Figura 3. 5– Cruzamento uniforme.

O desempenho que se obtém pela aplicação de cada um destes tipos de cruzamento depende do tipo de problema a resolver. Um dos aspectos que também se deve considerar quando se utiliza este operador genético é o da atribuição da probabilidade de cruzamento. Quanto maior for a probabilidade, maior também será a possibilidade de entrarem novos indivíduos na população. Os valores mais comuns para a probabilidade de cruzamento situam-se entre 0.6 e 1.0.

3.3.2.6 Mutação

A mutação é um operador genético que consiste em perturbar ligeiramente, tipicamente com probabilidade baixa, os indivíduos descendentes gerados por recombinação, através da alteração aleatória do valor de um dos genes do indivíduo. A mutação serve para fazer regressar à população determinados genes perdidos durante o processo de selecção, e também proporciona a entrada de novos genes na população. A mutação pode consistir apenas em determinar aleatoriamente uma posição num indivíduo e depois substituir o valor que se encontra nessa posição por um dos outros valores do conjunto associado à representação usada. Se existir mais do que um valor possível, este também deverá ser escolhido aleatoriamente. A figura 3.6 ilustra a aplicação da mutação uniforme a um indivíduo em que o dígito binário da posição 3 foi mutado.



Figura 3. 6– Mutação uniforme.

3.3.2.7 Re-inserção

Depois de gerar e avaliar os novos indivíduos, estes devem ser inseridos na população. É então necessário decidir: o número de indivíduos (descendentes) que serão escolhidos e os mecanismos de escolha dos indivíduos (progenitores) da população que irão ser substituídos.

Para a primeira decisão define-se uma taxa de substituição, que indica a proporção de indivíduos da população que pode ser substituída em cada geração. Uma taxa de substituição baixa traduz-se em menor diferenciação genética entre gerações e implica uma convergência mais lenta.

Existem diversos mecanismos de substituição sendo o mais simples aquele que gera o número de descendentes igual ao tamanho da população e substitui toda a população pelos novos indivíduos. As novas populações serão, assim, constituídas apenas por descendentes. Pode designar-se este esquema por substituição ou re-inserção pura.

Na substituição uniforme, os descendentes gerados são em número inferior ao tamanho da população. Esses descendentes irão substituir os progenitores da população, escolhidos de forma aleatória.

A substituição também pode garantir que os melhores indivíduos encontrados ao longo da procura se mantêm presentes na população. Na substituição elitista, define-se uma elite constituída pelos melhores indivíduos encontrados até ao momento. O número de descendentes gerados é inferior ao tamanho da população. Os indivíduos descendentes substituem os indivíduos da população que não fazem parte da elite. A escolha do número de indivíduos que constituem a elite está directamente relacionada com a pressão de selecção. Quanto maior for esse número mais influência da elite tende a existir no processo de pesquisa, e a diversidade da população tende a diminuir.

3.3.2.8 Diversidade

Um aspecto essencial no funcionamento adequado de um AG é a existência de diversidade entre os indivíduos da população. A diversidade da população é uma medida associada à diferenciação das soluções no espaço das soluções e/ou no espaço dos objectivos. Se os indivíduos forem muito semelhantes, a diversidade é baixa. Neste caso o operador genético cruzamento não tem capacidade de trocar informações úteis entre indivíduos da população, fazendo com que a pesquisa evolua muito lentamente ou mesmo que fique estagnada. Se o nível de diversidade for elevado, aumenta a possibilidade de escapar a óptimos locais uma vez que é possível explorar de forma mais abrangente o espaço de pesquisa. Normalmente, uma população maior apresenta maior diversidade; no entanto, é necessário que as populações tenham tamanhos finitos e não muito grandes. Caso contrário, o AG pode tornar-se não aplicável na prática, visto que controlar uma população demasiado grande pode envolver um esforço computacional incomportável.

Este aspecto será desenvolvido quando se considerarem os AGs multi-objectivo, uma vez que este aspecto é essencial na avaliação da qualidade das soluções encontradas num contexto multi-objectivo.

3.3.2.9 Critérios de paragem

O momento de paragem do processo evolucionário num AG pode estar associado quer ao ponto de evolução atingido pelo processo, quer ao esforço computacional, medido em tempo de execução do algoritmo.

Geralmente a conclusão do processo evolucionário dá-se quando se atinge (Eiben e Smith, 2003) uma das seguintes condições:

- número máximo de gerações;
- inexistência de melhoria significativa das soluções durante um número de gerações consecutivas;
- valor mínimo para o desvio padrão do valor de aptidão das soluções da população;

- tempo de CPU máximo;
- limiar mínimo de diversidade da população;
- uma “boa solução”, no caso de ser possível fazer essa avaliação.

Destes critérios os de utilização mais frequente são os dois referidos em primeiro lugar.

3.5 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTI-OBJECTIVO

Como foi referido na secção anterior, as características dos AE tornam-os particularmente bem adaptados a problemas em que existem múltiplos objectivos, uma vez que podem determinar várias soluções não dominadas em simultâneo numa só execução do algoritmo. Se tivermos ainda em consideração que uma das capacidades consideradas na avaliação de um algoritmo de resolução de problemas MO é o de encontrar o maior número de soluções da fronteira de Pareto, percebemos melhor a vantagem de trabalhar em cada iteração com uma população de soluções.

A sugestão de utilizar um método de pesquisa genética num problema com objectivos múltiplos é indicada em Deb (1999), como tendo sido sugerida pela primeira vez por Rosenberg, em 1967, na resolução de um problema de bioquímica (Rosenberg, 1967). No entanto, só muito mais tarde é que surgiu uma aplicação prática, VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), implementada por Schaffer (1983).

Posteriormente, Goldberg (1989) sugeriu um procedimento que utilizava a classificação das soluções por níveis de dominância. Esta sugestão deu origem a que anos mais tarde surgissem algoritmos evolucionários desenvolvidos com base neste procedimento. Destes, podem destacar-se por ordem de cronológica: Weight-Based Genetic Algorithm (WBGA) (Hajela e Lin, 1992), Multiple-Objective Genetic Algorithm (MOGA) (Fonseca e Fleming, 1993), Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) (Srinivas e Deb, 1993) e Niched-Pareto Genetic Algorithm (NPGA) (Horn et al., 1993) e Niched-Pareto Genetic Algorithm 2 (NPGA – 2) (Erickson et al., 2001).

Existe também um conjunto de abordagens que têm demonstrado muito sucesso, as quais, ao contrário das referidas anteriormente, incorporam elitismo. Alguns dos exemplos de abordagens elitistas mais referidas na literatura são: Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) (Zitzler e Thiele, 1998), Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II) (Deb et al., 2000) e Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA 2) (Zitzler et al., 2001).

É possível encontrar descrições pormenorizadas destas abordagens, assim como as suas principais vantagens, desvantagens e aplicações, não só nas referências originais, mas também em outros livros e artigos científicos, como por exemplo: Fonseca e Fleming (1995), Veldhuizen e Lamont (1998), Deb (1999), Coello (2000), Deb (2001) e Kicinger et al. (2005). Nesta secção

faz-se uma revisão breve sobre alguns AEMO, utilizando uma classificação seguida por Deb (2001).

3.5.1 Abordagens não elitistas

Existem diversas abordagens não elitistas para além das apresentadas neste ponto. Aqui descrevem-se as características que diferenciam algumas das mais referidas e habitualmente usadas: VEGA, WBGA, MOGA, NSGA e NPGA.

Alguns destes algoritmos, nomeadamente o VEGA e o MOGA, foram utilizados na resolução do problema tratado nesta tese. Devido a este facto são descritos detalhadamente no capítulo 5.

Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)

Schaffer (1984) foi o primeiro a implementar um AG para o cálculo de soluções não dominadas de um problema de optimização MO, ao qual deu o nome de Vector Evaluated Genetic Algorithm. Posteriormente este método foi comparado pelo seu autor, Schaffer (1995), com uma técnica de pesquisa adaptativa aleatória, tendo-se observado um melhor desempenho por parte do VEGA.

Apesar de apresentar algumas limitações, devido a cada solução ser avaliada apenas para uma das funções objectivo e durante o processo de selecção das soluções as que são próximas das soluções óptimas individuais de cada objectivo serem as escolhidas, não se atingindo a convergência para boas soluções de Pareto quando se faz o cruzamento destes “óptimos individuais”, (Schaffer (1995), Fonseca e Fleming (1995) e Deb (2001)), este algoritmo é um ponto de referência na área do AEMO, pela sua simplicidade e também porque foi pioneiro na tentativa de implementação de um AG para tratar problemas MO.

Weight-based Genetic Algorithm (WBGA)

O Weight-Based Genetic Algorithm (WBGA) foi introduzido por Hajela e Lin (1992). Tal como o nome sugere, neste algoritmo cada função objectivo $f_m(x)$ é multiplicada por um peso w_m ($m=1, \dots, M$). Cada indivíduo representa não só as variáveis de decisão, mas também os seus pesos associados.

Os valores de aptidão dos indivíduos da população são determinados utilizando um método de soma pesada, em que cada indivíduo da população tem associado uma combinação de pesos normalmente diferentes. Assim, não se determina apenas uma solução não dominada correspondente a uma combinação de pesos específica em cada iteração do AG, mas várias soluções não dominadas em simultâneo, correspondentes às várias combinações de pesos.

Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA)

Fonseca e Fleming (1993) sugeriram um AEMO que foi o primeiro a utilizar explicitamente o conceito de não dominância e que preserva simultaneamente a diversidade das soluções na população, com a designação Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA).

A principal diferença entre este algoritmo e um AG normal reside na forma como a aptidão é atribuída a cada solução. No MOGA a classificação de um determinado indivíduo da população é proporcional ao número de indivíduos da mesma população que o dominam. As restantes fases do algoritmo cumprem o desenrolar normal de um AG, com selecção universal estocástica, cruzamento com um ponto de corte e mutação binária simples.

Com o objectivo de garantirem a diversidade entre soluções não dominadas da população, Fonseca e Fleming (1993) introduziram uma estratégia baseada num esquema de nichos entre soluções com a mesma classificação.

Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

O procedimento proposto por Goldberg (1989), de classificação das soluções por níveis de dominância, foi implementado na sua totalidade por Srinivas e Deb (1993), numa abordagem designada por Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA).

Tal como o MOGA, este algoritmo também utiliza a selecção baseada no conceito de dominância para classificar as soluções. Neste algoritmo existe um mecanismo para distribuir as soluções por níveis de dominância e outro para preservar a diversidade entre soluções de cada frente não dominada.

Os outros operadores genéticos, cruzamento e mutação, são utilizados da forma habitual sobre toda a população.

Niched-Pareto Genetic Algorithm (NPGA)

O Niched-Pareto Genetic Algorithm (NPGA) foi proposto por Horn et al. (1993), diferindo das abordagens anteriores essencialmente no tipo de mecanismo de selecção que utiliza. Ao contrário de outras abordagens (VEGA, NSGA e MOGA) que aplicam a selecção proporcional à aptidão, o NPGA combina a técnica de partilha do valor de aptidão com um mecanismo de selecção por torneio.

Os algoritmos referidos nesta secção não utilizam qualquer estratégia de manutenção na população dos melhores indivíduos encontrados na pesquisa. Existem, no entanto, vários mecanismos para preservar estas soluções, utilizados em abordagens classificadas como elitistas.

3.5.2 Abordagens elitistas

Uma estratégia muito comum nos AE mais recentes é a incorporação de elitismo no processo de pesquisa. Num algoritmo com comportamento elitista, pretende-se garantir que sejam mantidos na população os melhores indivíduos, evitando a possível degradação do desempenho da população, ou seja, a diminuição da qualidade dos melhores indivíduos presentes numa dada geração em relação à anterior.

Ao contrário do que acontece nos AE mono-objectivo, incorporar elitismo num AEMO pode não ser trivial. No caso dos problemas MO não existe em cada geração uma solução candidata a eleita, mas um conjunto de soluções candidatas e, portanto, é necessário também decidir quais são os eleitos e de que forma o são. Escolher simplesmente todas as soluções não dominadas pode não ser o mais adequado em situações em que, por exemplo, existam muitas soluções nessas circunstâncias.

Desenvolveram-se diversos mecanismos para implementar elitismo, embora o mais comum seja a manutenção de uma população externa com os indivíduos não dominados encontrados até à geração corrente. A forma como essa população de eleitos influencia a população principal varia de algoritmo para algoritmo.

Aqui referem-se apenas três AEMO com comportamento elitista (o SPEA, o NSGA II e o SPEA 2), tendo a escolha recaído nos mais referenciados na literatura, com grande número de aplicações. As duas primeiras abordagens serão mais detalhadas no capítulo 5, uma vez que foram aplicadas ao problema tratado nesta tese.

Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)

O AEMO elitista proposto por Zitzler e Thiele (1998) com o nome Strength Pareto Evolutionary Algorithm mantém uma população externa de tamanho fixo, que guarda as soluções não dominadas obtidas na pesquisa. Em cada geração, as novas soluções não dominadas encontradas são comparadas com as já existentes nesta população externa, sendo guardadas as soluções não dominadas resultantes. Como o tamanho da população externa é limitado, para evitar que esta ultrapasse este limite, o SPEA utiliza uma técnica de agrupamento (*clustering*) que preserva as soluções mais dispersas.

Neste algoritmo as elites também participam, conjuntamente com a população corrente, na aplicação dos operadores genéticos, na esperança de influenciar a condução da população para regiões mais interessantes do espaço de pesquisa.

Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA – II)

Deb et al. (2000) desenvolveram um algoritmo, Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, que usa um mecanismo de preservação e diversificação de soluções.

Este algoritmo tem início com a geração aleatória de uma população P_0 , de tamanho N . Depois identifica várias frentes não dominadas, classificando a população em diferentes níveis de dominância, como foi descrito na secção 3.2.3 *Utilização da frente de Pareto*. A cada solução é atribuído um valor de aptidão igual ao seu nível de não dominância, começando por 1 para as soluções da primeira frente (as soluções não dominadas da população).

Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA 2)

Poucos anos depois de terem apresentado o SPEA, Zitzler et al. (2001) apresentaram uma versão melhorada deste algoritmo, a que chamaram SPEA 2.

As principais diferenças na versão de 2001 são:

- para determinar o valor de aptidão de uma solução, o método de cálculo baseia-se no número de soluções que a dominam e no número de soluções que são dominadas por ela;
- se necessário, para discriminar soluções com características de dominância idênticas, este método de cálculo do valor de aptidão incorpora uma técnica adicional para estimar a densidade de soluções nessa região do espaço de pesquisa;
- como o tamanho da população externa é constante, no caso de não haver soluções não dominadas em número suficiente, ela pode conter também soluções dominadas;
- no processo de selecção, apenas participam soluções da população externa.

3.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo abordaram-se as características dos modelos MO, dos AE e dos AEMO, e descreveram-se alguns AEMO desenvolvidos e implementados nos últimos anos. Os AEs têm demonstrado serem de grande utilidade na resolução de problemas MO complexos, uma vez que, como vimos, existe muita facilidade em fazer a sua adaptação às particularidades apresentadas por estes problemas.

Em muitos problemas MO complexos, à impossibilidade de otimizar em simultâneo objectivos conflituosos e incomensuráveis junta-se ainda a dificuldade do número de soluções existentes para o problema ser muito elevado. Os AEs, ao trabalharem com populações de soluções, ultrapassam o problema de se calcular apenas uma solução em cada iteração, tornando a pesquisa do espaço de soluções mais rápida e eficaz. Com a adaptação feita pelos AEMO temos, na maioria dos casos, algoritmos que incorporam, nos critérios de cálculo de aptidão das soluções e na orientação da pesquisa do espaço de soluções, as noções de dominância/não-dominância, fazendo com que as populações de soluções convirjam para a fronteira de soluções não dominadas mais rapidamente.

4

LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CONDENSADORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS: MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO TRÂNSITO DE POTÊNCIA

4.1 INTRODUÇÃO

No problema da compensação da energia reactiva em redes de distribuição radiais através da colocação de condensadores shunt, pretende-se determinar os locais da rede onde esses equipamentos deverão ser instalados bem como a respectiva capacidade, com o objectivo de minimizar as perdas na rede e minimizar o investimento requerido, respeitando os critérios de qualidade impostos pelas entidades reguladoras.

A instalação das baterias de condensadores implica um custo de investimento imediato e de manutenção a médio/longo prazo; simultaneamente existem variáveis de natureza técnica, de operação da rede e de qualidade de serviço que tornam bastante complexo o problema da determinação quer dos locais, quer das dimensões “óptimos”. O problema que é formulado matematicamente neste capítulo tem subjacente a necessidade de obter soluções que conciliem os múltiplos objectivos de quem explora a rede de distribuição.

Como já foi visto no capítulo 2, os trabalhos publicados em revistas e conferências científicas da área reconhecem que este é um problema em que existem objectivos em conflito e identificam normalmente três aspectos essenciais para avaliar o mérito das soluções:

- minimizar custos de instalação dos condensadores,
- minimizar perdas (potência e/ou energia)
- minimizar o desvio médio da tensão em relação ao ponto ideal de funcionamento do sistema.

Apesar do reconhecimento destes objectivos de natureza diversa, são poucos os trabalhos que propõem um modelo MO para tratar o problema.

O modelo aqui apresentado é baseado no inicialmente desenvolvido por Pires et al. (2005), considerando explicitamente dois objectivos: minimizar as perdas de potência activa nos alimentadores e minimizar o custo de instalação dos condensadores *shunt*. A manutenção do perfil de tensões dentro do intervalo estabelecido por lei é considerada como restrição.

4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE FUNCIONAMENTO DA REDE

Uma rede de distribuição radial é caracterizada por ligar a rede de transporte aos consumidores finais, fornecendo a potência (activa e reactiva) solicitada em cada instante nos pontos de consumo, e garantindo ao consumidor continuidade, qualidade e segurança no serviço. Em Portugal a exploração da rede de distribuição é regulamentada pelo Regulamento da Rede de Distribuição (Despacho n.º 13 615/99, de 16 de Julho, 2.ª Série), que tem por objectivo estabelecer as condições técnicas de exploração de redes de distribuição integradas no Sistema Eléctrico de Serviço Público, bem como as de ligação de instalações produtoras e consumidoras às redes de distribuição.

4.2.1 Caracterização de uma rede radial

4.2.1.1 Topologia Radial

A rede de distribuição em Baixa Tensão (BT) é geralmente explorada em topologia radial. Tal como o nome indica, numa rede com esta topologia os alimentadores não formam malhas, mas radiam a partir de um nó até ao consumidor final desse alimentador, Figura 4.7. A rede tem o seu início numa subestação (SE), que estabelece a ligação entre a rede de transporte e a de distribuição. Da SE parte o alimentador principal. Este apresenta pontos de derivação (nós ou barramentos), nos quais se podem encontrar cargas activas e reactivas alimentadas directamente, ramos laterais, postos de transformação e elementos de controlo da potência reactiva. Estes últimos caracterizam-se por fornecerem energia reactiva à rede (o caso dos condensadores), ou por consumirem energia reactiva da rede (o caso das indutâncias). Os ramos laterais têm a mesma estrutura do alimentador principal, com as modificações devidas à menor dimensão destes.

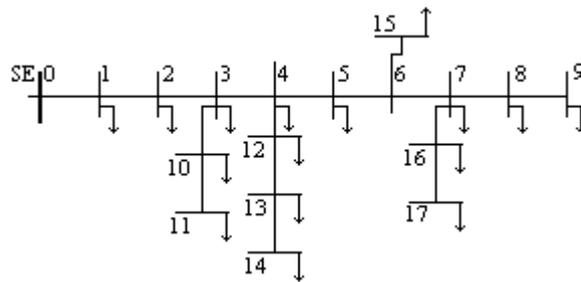


Figura 4.7 - Exemplo de uma rede de distribuição, considerando a existência de ramos laterais.

4.2.1.2 Simplificações

Normalmente, considera-se que a rede trifásica de distribuição é equilibrada e por isso pode ser representada pelo seu diagrama equivalente de uma só fase. Desta forma, todos os estudos feitos sobre uma fase podem generalizar-se às outras duas.

Com os comprimentos típicos dos alimentadores da rede de distribuição radial e com esta a operar aos níveis de tensão habitualmente utilizados nestas redes, considera-se que as capacidades *shunt* das linhas são desprezáveis.

4.2.1.3 Caracterização da procura

Nas redes de transporte e distribuição de energia a variação da procura é contínua, e a distribuição acompanha esta variação, satisfazendo a necessidade de potência, activa e reactiva, do consumidor a cada instante. Isto significa que a corrente que passa nos alimentadores varia também continuamente, em amplitude e fase.

Esta variação da procura é representada graficamente através do gráfico da variação da potência com o tempo, a que se dá o nome de Diagrama Diário de Carga (DDC). É prática comum aproximar a variação contínua da carga por uma variação discreta, obtendo um DDC em patamares. Considera-se que, em intervalos de tempo muito pequenos relativamente à amplitude da escala, a carga se mantém constante. Nesse intervalo de tempo pode caracterizar-se a rede por um determinado trânsito de potência, com valores de tensão e corrente constantes.

No problema de colocação de condensadores em redes de distribuição utiliza-se esta mesma aproximação, considerando-se que no intervalo $[t, t + \Delta t]$ o perfil de carga permanece constante. No entanto, para intervalos distintos no tempo a rede continua a apresentar necessidades de energia activa e reactiva diferentes; logo, o perfil de compensação terá que se adaptar a estas alterações.

Na resolução do problema da colocação de condensadores optou-se por considerar o instante de tempo em que o trânsito de energia reactiva é mais desfavorável para a operação do sistema (ver Capítulo 6, secção 6.3.2 Cenários de Carga). É para este caso que se resolve o problema de localização e dimensionamento das baterias de condensadores, de forma a minimizar as perdas no sistema e minimizar simultaneamente o respectivo custo da colocação.

Em relação aos períodos em que a carga desce e em que é necessário que a compensação se adapte à diminuição da procura, optou-se por colocar condensadores no lado de BT, equipados com relé varimétrico. Por isso, prevê-se a adaptação automática da compensação de energia reactiva com a variação da procura.

4.2.2 Qualidade de Serviço

Em relação à qualidade de serviço, a rede de distribuição obedece ao estipulado no Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS), (Despacho n.º 5255/2006 de 8 de Março, 2ª Série). Este documento estabelece os padrões de qualidade no fornecimento de energia eléctrica, no que respeita a:

Continuidade de Serviço: número e duração das interrupções de fornecimento.

Qualidade da Onda de Tensão: amplitude, frequência, forma da onda e simetria do sistema trifásico da tensão.

Qualidade Comercial: atendimento, informação, assistência e avaliação da satisfação dos clientes.

A regulação destes aspectos é efectuada através de indicadores e os respectivos padrões, estabelecidos no RQS e avaliados periodicamente pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE).

Uma das preocupações das empresas que exploram a rede de distribuição é a relativa à qualidade da onda de tensão. A norma qualidade NP EN 50160, IPQ (1996), que é a tradução da norma europeia correspondente, EN 50160, descreve as características principais da tensão de alimentação no ponto de entrega ao cliente. Esta norma é de cumprimento obrigatório para as empresas de distribuição pública em baixa ou média tensão, em condições de exploração normais. Esta norma apresenta a definição do conjunto de grandezas que estipulam os limites de variação da amplitude, forma de onda, frequência e simetria do sistema trifásico relativamente à tensão de alimentação no ponto de entrega, e simultaneamente caracteriza um conjunto de perturbações a que a rede pode estar sujeita. É um instrumento de referência para consumidores e empresas no que diz respeito à qualidade da tensão. Descrevem-se de seguida algumas das grandezas e limites de variação das mesmas, descritas neste documento.

Frequência:

- Deve ser igual a 50 Hz.

- Em condições normais o valor médio medido em intervalos de 10 minutos deve estar:

Entre 49,5 e 50,5 Hz durante 95% de uma semana.

Entre 47 e 52 Hz durante 100% de uma semana.

Tensão Nominal, U_n :

- A tensão nominal (U_n) deve ser igual a 230V entre fase e neutro (BT).
- Em condições normais, não considerando interrupções, 95% dos valores eficazes médios em intervalos de 10 minutos, devem estar na gama $U_n \pm 10\%$, para cada período de uma semana.

Desequilíbrio das tensões de Alimentação:

- Para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos da componente inversa das tensões não devem ultrapassar 2% da correspondente componente directa.

Tensão harmónica, U_h :

- A tensão harmónica, U_h , é a tensão sinusoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência da tensão de alimentação. A taxa de distorção harmónica, THD, não deve ultrapassar 8% em 95% dos períodos de 10 minutos.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}$$

Para além destas características, ainda existem mais definições, tal como a da tremulação (*flicker*) ou a tensão inter-harmónica, que serão de interesse para quem explora a rede ou para consumidores que têm nas suas instalações aparelhagem sensível. Esta norma refere-se exclusivamente à tensão de alimentação no ponto de entrega, e por isso nada diz em relação a harmónicas de corrente, nem valores típicos, nem máximos admissíveis ou consequências do conteúdo harmónico da corrente fornecida nas instalações dos clientes.

O cumprimento da norma é verificado quando todos os valores se encontram no intervalo de confiança de 95%. Actualmente o RQS impõe que o distribuidor verifique anualmente o cumprimento desta norma em diversos pontos do país, fornecendo esses dados à ERSE.

De notar que o cumprimento da norma por parte da empresa distribuidora pode não ser garantia total para o consumidor da ausência de problemas no fornecimento. Existe um conjunto de perturbações imprevisíveis que podem acontecer, e que são impossíveis de evitar. Estas podem definir-se como:

Cava:

- Abaixamento do valor eficaz da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 1% de U_n durante um período entre 10 ms e 1 minuto.

Interrupção da alimentação:

- Variação da tensão para menos de 1% de U_n :

Interrupção curta, inferior a 3 minutos: defeito transitório.

Interrupção longa, superior a 3 minutos: defeito permanente.

Existem também perturbações devidas a sobretensões, a problemas com o neutro da instalação, e a manobras ou descargas atmosféricas.

Dada a aleatoriedade dos fenómenos que originam as perturbações, a norma não contempla nenhuma obrigatoriedade por parte dos distribuidores para cavas e sobretensões, limitando-se a referir valores típicos e as suas origens. São os utilizadores que têm que se equipar com os meios técnicos necessários para garantirem a imunidade das suas instalações a este tipo de ocorrências.

4.2.3 Trânsito de Potência em Redes Radiais

Um consumidor ligado a uma rede de distribuição de energia eléctrica pretende ter em cada instante na sua instalação, as potências, activa e reactiva, que os seus equipamentos eléctricos necessitem, nas condições de qualidade estipuladas pelo RQS. Como foi descrito no ponto anterior, estas condições prendem-se com a continuidade de serviço e a qualidade da onda de tensão (amplitude, frequência, forma da onda e simetria do sistema trifásico da tensão).

Do ponto de vista do distribuidor este pretende prestar este serviço, mantendo as condições de funcionamento da rede a um custo mínimo. Para isso precisa de instrumentos que o auxiliem a conhecer e otimizar o funcionamento da rede.

Um desses instrumentos básicos de conhecimento do funcionamento da rede é a análise do trânsito de potência. Esta permite-nos saber, dada uma configuração de carga num determinado instante, as grandezas eléctricas em cada ponto da rede: corrente, módulo e argumento, nos alimentadores, tensões, módulo e argumento, nos barramentos e todas as grandezas eléctricas que podem ser calculadas através destas duas. Conhecendo o trânsito de potência é possível analisar, quer as condições de funcionamento nesse instante, quer as suas modificações resultantes de alguma alteração, como, por exemplo, a entrada/saída de consumidores, variações nos níveis de consumo, e também a introduzida pela colocação de baterias de condensadores em nós da rede, bastando para isso calcular um novo trânsito de potência para a rede com as novas condições de funcionamento. A análise do trânsito de potência é, assim, uma ferramenta indispensável para o estudo da rede, e as suas equações fazem parte do conjunto de restrições do modelo matemático proposto.

Existem diversas abordagens ao problema do trânsito de potência e várias formas de modelar o sistema. No entanto, para a análise do trânsito de potência as abordagens mais conhecidas, como os métodos de *Newton-Raphson* ou *Gauss Seidel*, não foram desenvolvidas para redes com topologias radiais, mas sim para redes com topologias em anel.

As redes de distribuição radiais apresentam características muito distintas relativamente às de transporte, sobretudo no que se refere à topologia e comprimento dos alimentadores. Numa rede radial existem vários pontos de carga e alimentadores de menor comprimento em que a razão R/X é elevada. Isto faz com que não seja eficiente aplicar metodologias convencionais de resolução do trânsito de potência desenvolvidas para redes de transporte, uma vez que a sua convergência é comprometida se não se adoptarem técnicas de tratamento de matrizes esparsas.

Existem alguns trabalhos que se destinam especificamente a tratar o problema do trânsito de potência em redes radiais, tais como Chen et al. (1991), Moon et al. (1999) e Expósito e Ramos (1999). Das et al. (1994) apresenta um algoritmo de resolução substancialmente diferente dos convencionais, adaptado a redes com topologia radial. Matos (2001) propõe também um algoritmo de cálculo para o trânsito de potência em que se calculam módulo e argumento de todas as grandezas, e não apenas o módulo, como em alguns dos trabalhos referidos. Baran e Wu (1989a e 1989b) propõem uma abordagem ao problema da optimização de energia reactiva em redes radiais, e apresentam contribuições para o cálculo do fluxo de cargas também adaptadas ao carácter radial destas redes. Pires et al. (2005) utiliza uma abordagem baseada em algumas equações propostas por Baran e Wu (1989a e 1989b) e no algoritmo de Das et al. (1994) adaptada a redes radiais.

No presente trabalho a aplicação computacional foi totalmente desenvolvida em MATLAB. Todas as grandezas foram definidas como números complexos, tirando partido das potencialidades do MATLAB para o desenvolvimento de um algoritmo de cálculo do trânsito de potência baseado em números complexos, como se descreve a seguir. Esta opção revelou-se computacionalmente rápida e permite obter as grandezas eléctricas com grande precisão.

4.2.3.1 – Equações de Funcionamento da Rede

Notação utilizada neste ponto:

SE – Subestação;

k - iteração;

m - índice de barramento a montante;

t - índice de barramento a jusante;

M – número de barramentos da rede de distribuição;

B_m – Barramento m ;

\bar{S}_m - vector potência aparente total que chega ao barramento m ;

P_m - potência activa que chega ao barramento m ;

Q_m - potência reactiva que chega ao barramento m ;

\bar{S}_{Cm} - vector potência aparente de compensação no barramento m ;

Q_{Cm} - potência reactiva de compensação no barramento m ;

\bar{S}_{Lm} - vector potência aparente de carga no barramento m ;

P_{Lm} - potência activa de carga no barramento m ;

Q_{Lm} - potência reactiva de carga no barramento m ;

$\bar{S}_{perdas(m)}$ - vector potência aparente de perdas totais nos alimentadores a jusante do barramento m ;

$P_{perdas(m)}$ - potência activa de perdas totais nos alimentadores a jusante de m ;

$Q_{perdas(m)}$ - potência reactiva de perdas totais nos alimentadores a jusante de m ;

\bar{I}_m - vector corrente total que chega ao barramento m ;

\bar{U}_m - vector tensão eficaz no barramento m ;

δ_m - ângulo da tensão no barramento m ;

\bar{I}_m - vector corrente que circula no alimentador que chega ao barramento m ;

\bar{Z}_{mt} - impedância do troço que liga o barramento m ao barramento j ;

r_{mt} - resistência do troço que liga o barramento m ao barramento j ;

x_{mt} - reactância do troço que liga o barramento m ao barramento j ;

Y - número máximo de condensadores de diferentes dimensões que é possível instalar;

Q_{Fu} - capacidade do condensador u ($u=1, \dots, Y$);

c_u - custo do condensador u ;

\bar{X}^* - conjugado do vector genérico \bar{X} .

Os vectores são compostos da seguinte forma:

$$\bar{Z}_{mt} = r_{mt} + jx_{mt} \quad 4.1$$

$$\bar{S}_m = P_m + jQ_m \quad 4.2$$

$$\bar{V}_m = a_m + jb_m \quad 4.3$$

$$\bar{S}_{Lm} = P_{Lm} + jQ_{Lm} \quad 4.4$$

$$\bar{S}_{Cm} = -jQ_{Cm} \quad 4.5$$

$$\bar{S}_{perdas(m)} = P_{perdas(m)} + jQ_{perdas(m)} \quad 4.6$$

A rede de distribuição é um circuito eléctrico em corrente alternada, com algumas características particulares, ao qual se podem aplicar as mesmas regras de análise de circuitos em corrente alternada que se aplicam a sistemas de muito menor dimensão. Deste modo, as equações de trânsito de potência de uma rede radial podem ser facilmente escritas considerando as expressões que relacionam as grandezas corrente, tensão e potências aparente, activa e reactiva e as Leis de Kirchhoff da corrente e da tensão.

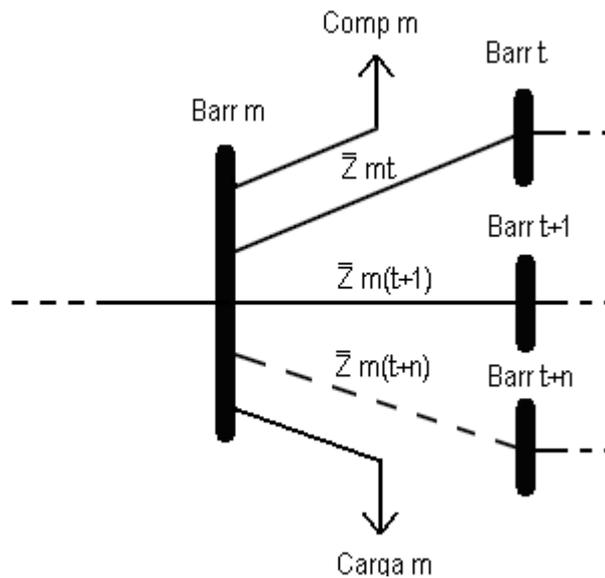


Figura 4.8 – Alimentador genérico.

Antes de prosseguirmos com a descrição das equações matemáticas que descrevem o funcionamento da rede, consideremos o alimentador descrito na Figura 4.8. Representa-se nesta figura um barramento genérico a montante, barramento m , em que se admite a existência de compensação e/ou carga a ser alimentada directamente, e que se encontra ligado a outros barramentos a jusante ($t, t+1, \dots, t+n$), através de linhas que apresentam uma determinada impedância. Este barramento representa cada um dos barramentos da rede. Cada um pode ser visto como um nó que recebe potência de outro nó (a montante) e a entrega em vários pontos (carga, compensação, e barramentos). Ao descrevermos assim a rede, sem haver a preocupação de saber se os barramentos a jusante do barramento m pertencem ao alimentador principal ou secundário, as equações que descrevem o funcionamento do sistema simplificam-se e o método de cálculo do trânsito de potência na rede torna-se expedito e de fácil explicação. Como se pode ver na Figura 4.8, cada barramento

só tem uma entrada de potência, mas a partir dele podem derivar desde zero a múltiplas saídas (entre carga alimentada directamente, potência de compensação e alimentadores que o ligam a barramentos a jusante).

A potência aparente que chega ao barramento t é dada pelo produto da tensão nesse barramento pela corrente que nele entra, i.e., a corrente que circula na linha que liga o barramento m , a montante, ao barramento t , 4. 7.

$$\bar{S}_t = \bar{V}_t \bar{I}_t^* \quad 4. 7$$

Podemos também escrever a expressão da corrente \bar{I}_t , 4. 8:

$$\bar{I}_t = \left(\frac{\bar{S}_t}{\bar{V}_t} \right)^* \quad 4. 8$$

Se considerarmos a impedância, \bar{z}_{mt} , do troço que liga os dois barramentos, Figura 4.8, podemos também escrever a expressão que relaciona as tensões nos extremos deste, i.e. a tensão no barramento t é igual à tensão no barramento m menos a queda de tensão no troço que liga os dois barramentos, 4. 9.

$$\bar{V}_t = \bar{V}_m - \bar{z}_{mt} \times \bar{I}_t \quad 4. 9$$

E considerando a relação 4. 8, podemos obter a expressão final:

$$\bar{V}_t = \bar{V}_m - Z_{mt} \times \left(\frac{\bar{S}_t}{\bar{V}_t} \right)^* \quad 4. 10$$

As equações das potências são obtidas por aplicação da lei da conservação de energia a cada barramento da rede. Considerando os nós genéricos na Figura 4.8., m e t , e a seguinte definição, 4. 11:

$$\bar{V}_{mt} = \bar{V}_m - \bar{V}_t \quad 4. 11$$

podemos escrever as perdas no troço que liga m a t :

$$\bar{S}_{perdas(mt)} = \bar{V}_{mt} \times \left(\frac{\bar{S}_t}{\bar{V}_t} \right)^* \quad 4. 12$$

Pode escrever-se a expressão das perdas nos alimentadores que partem do barramento m (ver também figura 4.2)

$$\bar{S}_{perdas(m)} = \bar{V}_{m1} \times \left(\frac{\bar{S}_1}{\bar{V}_1} \right) + \bar{V}_{m(t+1)} \times \left(\frac{\bar{S}_{(t+1)}}{\bar{V}_{(t+1)}} \right) + \dots + \bar{V}_{m(t+n)} \times \left(\frac{\bar{S}_{(t+n)}}{\bar{V}_{(t+n)}} \right) \quad 4.13$$

que equivale à expressão:

$$\bar{S}_{perdas(m)} = \sum_{i=0}^n \left(\bar{V}_{m(t+i)} \times \left(\frac{\bar{S}_{t+i}}{\bar{V}_{t+i}} \right)^* \right) \quad 4.14$$

Considerando a Figura 4.8 e a expressão anterior, 4.14, podemos escrever:

$$\bar{S}_m = \sum_{i=0}^n \bar{S}_{t+i} + \sum_{i=0}^n \left(\bar{V}_{m(t+i)} \times \left(\frac{\bar{S}_{t+i}}{\bar{V}_{t+i}} \right)^* \right) + \bar{S}_{Lm} + \bar{S}_{Cm} \quad 4.15$$

Isto é, a potência que “entra” no barramento m tem que ser igual ao somatório de todas as potências que “partem” dele. Como se descreve na expressão 4.15, a potência \bar{S}_m será igual à carga alimentada directamente a partir de m , mais a potência de compensação, se existir, no barramento m , mais o somatório das potências de perdas nos alimentadores que ligam o barramento m a todos os barramentos que estão a jusante de m , mais o somatório das potência injectadas nos barramentos a jusante de m .

As potências activa e reactiva que entram no barramento m podem ser obtidas extraíndo a parte Real e a parte Imaginária de \bar{S}_m , respectivamente, 4.16 e 4.17:

$$\bar{P}_m = \text{Re}(\bar{S}_m) \quad 4.16$$

$$\bar{Q}_m = \text{Im}(\bar{S}_m) \quad 4.17$$

4.2.3.2 – Restrições de Funcionamento

Como foi descrito anteriormente, a rede de distribuição apresenta uma determinada topologia, está sujeita a um perfil de carga variável no tempo, e apresenta condições técnicas que influenciam o seu funcionamento e o modelo que o descreve.

Na operação de uma rede de distribuição, e no cálculo do trânsito de potência para determinada configuração de carga, é necessário ainda considerar alguns elementos tais como as condições e restrições de operação.

As primeiras referem-se aos elementos conhecidos, necessários para resolver o problema de trânsito de potência. Neste caso consideram-se como dados:

- a tensão na Subestação,
- a configuração da rede radial,
- a carga, activa e reactiva, solicitada em cada nó,
- a possibilidade de se colocar ou não compensação em cada nó.

Em relação às restrições, existem as impostas pelo RQS, nomeadamente as das características da tensão de alimentação no ponto de entrega ao cliente. Considera-se que a amplitude da tensão deve situar-se no intervalo $\pm 10\%$ da tensão nominal.

4.2.3.3 – Método Utilizado no Cálculo do Trânsito de Potência

O trânsito de potência é calculado de forma diferente dos trabalhos referidos, Chen et al. (1991), Das et al. (1994), Moon et al. (1999) e Expósito e Ramos (1999), Matos (2001) e Pires et al. (2005).

Para realizar o cálculo do trânsito de potência é necessário dispor de dados sobre a topologia da rede, i.e. quais os barramentos que estão ligados, e as resistências e reactâncias dos diversos troços que ligam os barramentos. Para além destes dados, é ainda necessário conhecer a configuração de carga para a qual se vai fazer o cálculo do trânsito de potência. Estes dados são usualmente disponibilizados pelos exploradores da rede de distribuição.

Inicialmente os barramentos da rede de distribuição são numerados por ordem sequencial, começando pelos do alimentador principal e depois os dos ramos laterais, como no exemplo da Figura 4.7.

O método de cálculo é iterativo e pode descrever-se em linguagem corrente:

- De início consideram-se as simplificações: perdas nulas e tensões em todos os barramentos iguais a 1 p.u. Desta forma é possível calcular, na primeira corrida do trânsito de potência, uma estimativa para as perdas nas linhas e da potência que chega a cada barramento da rede. I.e. calcula-se uma estimativa para $\bar{S}_{perdas(m)}$ e \bar{S}_m , $m=1,\dots,M$ (considerando uma rede com M barramentos e $M-1$ alimentadores).

- Recordando que a potência que chega a cada barramento compreende o valor total que circula na rede a partir desse nó (ver expressão 4. 15), a potência requerida no primeiro barramento (a SE, $m=1$) será toda a potência necessária para o funcionamento da rede, e a potência necessária no último barramento de cada alimentador (principal ou secundário) será apenas a carga alimentada directamente nesse barramento e a potência de compensação, se existir.

- Assim, a potência é calculada partindo do último barramento até ao primeiro barramento de cada alimentador (principal ou secundário), até chegar finalmente ao primeiro barramento do alimentador principal, i.e. à SE. O valor da potência calculado para cada barramento é imediatamente usado no cálculo da potência do seu predecessor.

- No cálculo da tensão utiliza-se a expressão 4. 10. Assume-se para o primeiro barramento (a SE, $m=1$): $\bar{V}_1 = 1 \text{ p.u.}$ e $\delta_1 = 0^\circ$.

- As tensões nos barramentos são calculadas do primeiro barramento para o último barramento da rede. Cada valor de tensão calculado é imediatamente incorporado no cálculo do seu sucessor.

- O processo iterativo termina quando a diferença entre os valores de todas as tensões dos barramentos em duas iterações sucessivas for inferior a um valor ε_0 na ordem 10^{-4} , como descrito em 4. 18, em que k é o contador de iterações:

$$(\bar{V}_m)^k - (\bar{V}_m)^{(k-1)} \leq \varepsilon_0, m = 1, \dots, M \quad 4. 18$$

Vejamos agora um exemplo para ilustrar o método iterativo de cálculo do trânsito de potência.

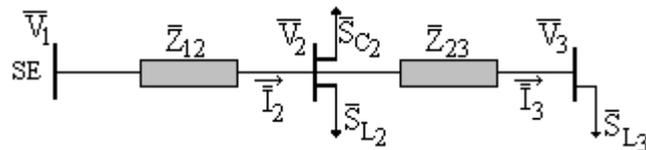


Figura 4.9 – Rede do exemplo ilustrativo do cálculo do trânsito de potência.

Consideremos a rede simples com 3 barramento da Figura 4.9. As potências fornecidas a partir dos nós 1, 2 e 3 são calculadas através da expressão 4. 15, como se ilustra a seguir:

$$\bar{S}_3 = \bar{S}_{L3} \quad 4. 19$$

$$\bar{S}_2 = \bar{S}_{L2} + \bar{S}_{C2} + \bar{S}_3 + \bar{V}_{23} \times \left(\frac{\bar{S}_3}{\bar{V}_3} \right)^* \quad 4. 20$$

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_{L1} + \bar{S}_2 + \bar{V}_{12} \times \left(\frac{\bar{S}_2}{\bar{V}_2} \right)^* \quad 4. 21$$

No que respeita ao cálculo das tensões, utiliza-se a expressão 4. 10. Para o exemplo da figura, e considerando que $\delta_1 = 0^\circ$ e $\bar{V}_1 = 1 \text{ p.u.}$, podemos efectuar o cálculo como se segue:

$$\bar{V}_1 = V_1 \quad 4. 22$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - \bar{Z}_{12} \left(\frac{\bar{S}_2}{\bar{V}_2} \right)^* \quad 4.23$$

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_2 - \bar{Z}_{23} \left(\frac{\bar{S}_3}{\bar{V}_3} \right)^* \quad 4.24$$

No caso das potências o cálculo é feito do último barramento para o primeiro, uma vez que se conhece a potência alimentada a partir deste barramento. No caso das tensões o cálculo é feito do primeiro barramento para o último, uma vez que se conhece a tensão na SE.

Este método foi desenvolvido em ambiente MATLAB e revelou-se rápido e preciso. Os valores obtidos foram comparados com os calculados por um programa utilizado na EDP Distribuição, DINIS (Distribution Network Information System), apresentando resultados semelhantes.

4.3 MODELO MATEMÁTICO

Pretende-se, dada uma rede de distribuição radial, com um perfil de carga variável no tempo, obter a localização e dimensão adequadas das baterias de condensadores a colocar nos barramentos, com os objectivos de atingir as condições de exploração com menores perdas ao custo mais baixo. Nesta secção parte-se desta formulação em linguagem corrente e na descrição do funcionamento técnico da rede feita na secção anterior, para apresentar a formulação de um modelo de programação matemática multiobjectivo.

Como foi referido anteriormente, a compensação da energia reactiva nas redes de energia eléctrica tem normalmente em vista a redução das perdas globais no sistema. No entanto, os aspectos de avaliação são múltiplos, conflituosos e não comensuráveis.

Para além da redução das perdas, podem referir-se outros benefícios para o sistema devidos à colocação de dispositivos de compensação de energia reactiva, nomeadamente condensadores, tais como: a redução da potência de pico, a melhoria do perfil de tensões e consequente melhoria da qualidade de serviço, bem como a própria redução da carga a que todo o sistema fica sujeito.

Em conflito com o objectivo que se relaciona directamente com a minimização de perdas resistivas, que contribui para a redução do custo global de exploração da rede, está o investimento necessário para adquirir, colocar e fazer a manutenção dos condensadores utilizados na compensação.

Nesta secção é apresentado um modelo multiobjectivo de apoio à decisão para o problema da localização e dimensionamento de condensadores em redes de distribuição radiais, baseado no trabalho que tem vindo a ser desenvolvido pela autora neste domínio (Pires et al., 2005).

4.3.1 Condensadores

Considera-se como condição do problema que as baterias de condensadores são unidades organizadas em escalões, controladas automaticamente por um relé varimétrico, colocadas no barramento de baixa tensão dos Postos de Transformação escolhidos. São utilizados condensadores de valor padrão para aproximar o mais possível os dados do problema às características dos equipamentos disponíveis no mercado.

Tabela 4. 1 – Condensadores, relação capacidade e custo.

(Q_{Fi})	Custo (c_i)
Q_{F0}	0
Q_{F1}	c_1
(...)	(...)
Q_{Fj}	c_j
(...)	(...)
Q_{FN}	c_Y

Usa-se uma tabela, como por exemplo a Tabela 4. 1, para relacionar o custo das baterias de condensadores com a sua dimensão. Esta representação permite ter alguma flexibilidade na implementação computacional dos modelos, uma vez que se podem livremente alterar os valores das capacidades ou actualizar os valores dos custos.

No custo das baterias apenas está considerado o custo de aquisição.

4.3.2 Funções Objectivo e Restrições

O problema de localização incorpora explicitamente dois objectivos - a minimização das perdas activas do sistema e a minimização do custo dos equipamentos de compensação - considerados num ambiente de apoio à decisão multiobjectivo.

O problema torna-se complexo devido à não linearidade das equações que descrevem o trânsito de potência e ao elevado número de variáveis, binárias e reais, necessárias para caracterizar a operação da rede e as grandezas associadas aos diversos nós do sistema. Além disso, a alteração de uma grandeza, como por exemplo a potência reactiva, faz com que o trânsito de potência tenha que ser recalculado a fim de se verificarem as restrições de igualdade (as próprias equações de operação) e de desigualdade (limites de operação).

O modelo recorre a variáveis binárias associadas à localização e dimensionamento da compensação a colocar num determinado nó.

As funções objectivo consideradas dizem respeito à minimização de perdas na rede, 4. 25, e à minimização do custo da compensação da energia reactiva, 4. 26. De notar que o valor das perdas em potência activa é obtido através da parte real do vector potência aparente de perdas do alimentador que liga os barramentos m a $m+1$. O significado do índice t é o mesmo da Figura 4.8.

$$\text{Min} \sum_{m=1}^M \left\{ \text{Re} \left[\sum_{i=0}^n \left(\bar{V}_{m(t+i)} \times \left(\frac{\bar{S}_{t+i}}{\bar{V}_{t+i}} \right)^* \right) \right] \right\} \quad 4. 25$$

$$\text{Min} \sum_{m=0}^M \sum_{u=1}^Y a_m^u c_u \quad 4. 26$$

onde a_m^u é uma variável de decisão binária que indica:

$$a_m^u = \begin{cases} 1 & \text{se o novo condensador } Q_{Fu} \text{ é instalado em } B_m \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad 4. 27$$

O coeficiente binário b_m indica se é tecnicamente possível instalar um condensador num dado nó m da rede:

$$b_m = \begin{cases} 1 & \text{se é possível colocar o condensador em } B_m \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad 4. 28$$

A potência reactiva de compensação em cada barramento é dada pela equação 4. 29 e a sua expressão pode ser substituída directamente nas equações em que aparece.

$$Q_{Cm} = b_m \sum_{u=1}^Y a_m^u Q_{Fu} \quad \forall m \quad 4. 29$$

As soluções admissíveis do problema têm que respeitar um conjunto de restrições que permitem garantir o funcionamento do sistema e asseguram que as condições definidas previamente sejam respeitadas.

As restrições de igualdade, equações que garantem a operação do sistema, correspondem às equações 4. 10 e 4. 15, e traduzem o trânsito de potência na rede radial.

Como foi referido na secção 4.2.2 Qualidade de Serviço, é necessário que a tensão nos nós do sistema permaneça dentro de valores que assegurem a qualidade de serviço. A condição 4. 30

garante que o perfil de tensões das soluções admissíveis esteja no intervalo $[V_{\text{mínimo}}, V_{\text{máximo}}] \forall m,$

$$V_{\text{mínimo}} \leq V_m \leq V_{\text{máximo}} \quad \forall m \quad 4.30$$

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo descreve-se um modelo de programação matemática multiobjectivo para o problema de colocação e dimensionamento de condensadores em redes de distribuição para compensação do factor de potência. Este modelo tem em conta aspectos técnicos de operação e de qualidade de serviço da rede de distribuição, bem como os objectivos de exploração/planeamento das empresas de distribuição.

Este problema apresenta aspectos conflituosos para a avaliação do mérito das soluções potenciais. A redução de custos está em conflito com a redução das perdas do sistema por compensação da energia reactiva. Por outro lado, a melhoria do perfil de tensões é um aspecto importante a considerar, podendo estar em conflito com qualquer um dos outros aspectos de avaliação. Assim, o problema é por natureza um problema multiobjectivo, envolvendo aspectos económicos, de operação e de qualidade de serviço.

No modelo matemático desenvolvido foram explicitamente consideradas como funções objectivo a minimizar o custo de instalação dos condensadores e as perdas activas na rede. O perfil de tensões foi considerado como restrição.

Usando este modelo multiobjectivo instanciado com dados sobre as redes e os equipamentos e aplicando as abordagens algorítmicas descritas nos capítulos seguintes, o gestor da rede tem possibilidade de escolher soluções de compromisso satisfatórias entre os dois objectivos que estão em jogo e lhe interessam em simultâneo, satisfazendo diversas categorias de restrições. O modelo matemático tem ainda a vantagem de respeitar a natureza discreta das variáveis, relativamente à capacidade dos equipamentos e local de instalação. Permite também escolher previamente os locais onde não convém colocar compensação, seja por motivos técnicos, seja por motivos operacionais.

Foi ainda apresentada uma abordagem algorítmica para o cálculo do trânsito de potência, que se destina a verificar as restrições de funcionamento do sistema incluídas no modelo.

5

ALGORITMOS TESTADOS E OPÇÕES DE APLICAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Com o objectivo de resolver o problema de colocação e operação de condensadores em redes de distribuição de energia eléctrica foram desenvolvidas em ambiente MATLAB várias aplicações baseadas em AEMO. Foram testados alguns algoritmos na sua forma original, que possibilitaram a realização de estudos comparativos. Posteriormente exploraram-se algumas alterações aos algoritmos originais que mostram contribuir para a obtenção de um conjunto de soluções mais diversificado e que melhor caracterizam a fronteira de Pareto.

Neste capítulo detalham-se os algoritmos testados e que foram brevemente descritos no capítulo 3. Mostram-se também algumas opções que foram tomadas, relativamente à sua aplicação ao problema proposto.

5.2 DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS TESTADOS

5.2.1 Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)

A primeira implementação de um AEMO foi proposta por Schaffer (Schaffer, 1984). O algoritmo sugerido foi designado por Vector Evaluated Genetic Algorithm uma vez que é avaliado um vector de múltiplas funções objectivo, em vez de uma função objectivo escalar.

O VEGA é o mais simples AG multiobjectivo, e surge como uma extensão natural de um AG mono-objectivo. Schaffer propõe a divisão aleatória da população do AG em M sub-populações de dimensão idêntica em cada geração, sendo M o número de funções objectivo. Afecta-se a cada sub-população uma função objectivo, para que as soluções dessa sub-população sejam avaliadas segundo esse objectivo. Às soluções de cada uma das sub-populações é atribuído um valor de aptidão, de acordo com o respectivo objectivo. Desta forma, cada uma das funções objectivo serve para avaliar apenas alguns indivíduos da população.

As soluções da população são posteriormente seleccionadas por um mecanismo de selecção proporcional à aptidão. Consideremos um problema com cinco funções objectivo ($M=5$). Na Figura 5.1 ilustra-se a atribuição da aptidão às soluções segundo o VEGA. A população é dividida em 5 conjuntos com a mesma dimensão, ficando cada conjunto associado a uma função objectivo. A cada indivíduo da primeira sub-população é atribuído um valor de aptidão de acordo com a avaliação baseada na primeira função objectivo, sendo este procedimento repetido para as outras sub-populações. Por último aplica-se o operador genético selecção, que é restrito às soluções de cada população.

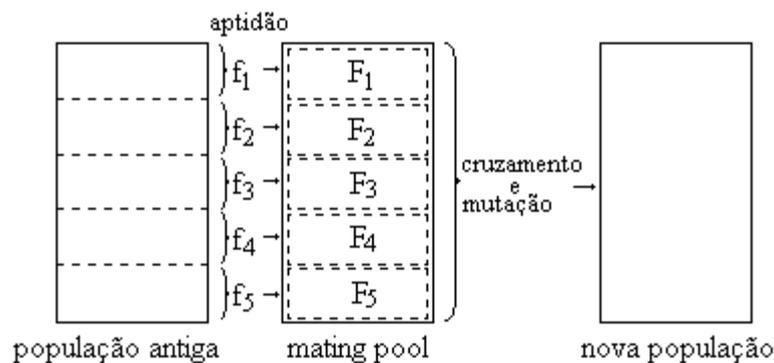


Figura 5.1 – Detalhe gráfico do VEGA.

A avaliação de cada sub-população separadamente faz com que se distingam as soluções com melhor comportamento no que respeita a cada objectivo. Uma das vantagens deste método reside em evitar problemas com a disparidade de ordens de grandeza que possam existir entre as funções objectivo, uma vez que não há comparação da aptidão de duas soluções que pertençam a sub-populações diferentes.

Tendo como finalidade o estabelecimento de soluções de compromisso, o algoritmo permite depois o cruzamento entre soluções de toda a população, de forma a poderem cruzar-se duas soluções boas, cada uma avaliada segundo objectivos diferentes. Assim, os descendentes teriam possibilidade de serem boas soluções de compromisso relativamente a dois objectivos. O operador mutação é depois também aplicado sobre toda a população.

O algoritmo pode ser descrito pelo conjunto de passos:

ALGORITMO (VEGA)

Passo 1 Coloca contador $i = 1$ e define $q = N/M$ (N – tamanho da população, M – número de funções objectivo).

Passo 2 Para todas as soluções $j=1+(i-1)*q$, atribuir a aptidão: $F(x^j) = f(x^j)$.

Passo 3 Fazer a selecção proporcional em todas as q soluções para criar a *mating pool* P_i .

Passo 4 Se $i=M$ vai para o passo 5. Caso contrário $i=i+1$ e vai para o passo 2.

Passo 5 Combina todas as *mating pool*: $P = \cup_{i=1}^M P_i$. Aplica cruzamento e mutação em P para criar uma nova população.

Este algoritmo destaca as melhores soluções individuais de cada objectivo. Com a intenção de encontrar soluções de compromisso com qualidade intermédia, o algoritmo permite o cruzamento entre quaisquer duas soluções da população (mesmo que pertençam a subpopulações distintas). Desta forma, o autor pretende encontrar descendentes que sejam boas soluções de compromisso. O operador mutação é aplicado a qualquer solução como num AG mono-objectivo.

Este algoritmo é um ponto de referência na área do AEMO pela sua simplicidade e porque foi pioneiro na tentativa de implementação de um AG para tratar problemas MO.

5.2.2 Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA)

O algoritmo proposto por Fonseca e Fleming (1993), Multiple Objective Genetic Algorithm (MOGA), foi o primeiro a utilizar o conceito de dominância, a realçar explicitamente as soluções não dominadas e simultaneamente a manter a diversidade entre soluções não dominadas. A principal característica que distingue o MOGA de um AG normal é a forma como a aptidão é calculada, uma vez que o algoritmo é idêntico ao AG clássico (com selecção estocástica universal, cruzamento de ponto simples e mutação por lugar (*bitwise*)).

A atribuição da aptidão a uma solução está dividida em três fases, num conjunto de procedimentos que permitem destacar as melhores soluções atribuindo-lhes um valor de aptidão mais elevado, quer por dominância, quer por diversidade.

Inicialmente é associada a cada solução uma classificação, *ranking*, de valor igual ao número de soluções n_i que a dominam mais um: $r_i=1+n_i$. Assim as soluções não dominadas da população possuem classificação igual a 1, uma vez que não existe nenhuma solução que as domine. Na Figura 5.1 pode ver-se o espaço de pesquisa de um problema em que se pretende minimizar duas funções objectivo e a classificação, segundo o MOGA, das soluções encontradas.

Depois de atribuir a classificação r_i às soluções da população, atribui-se um valor de aptidão preliminar a cada solução através de uma função linear ou de outro tipo. Pretende-se que esta função permita ordenar as soluções atribuindo valores inteiros consecutivos desde N (para as melhores soluções), até 1 (para as soluções com pior classificação).

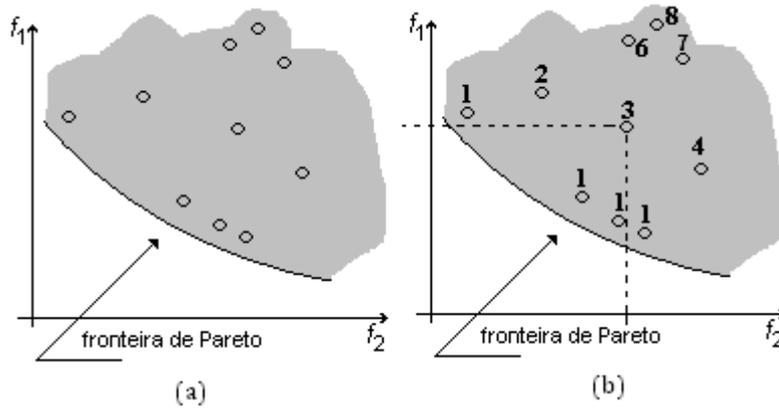


Figura 5. 2 – (a) Espaço de pesquisa de um problema com duas funções objectivo e (b) classificação segundo o algoritmo MOGA.

Por último, é atribuído um valor final de aptidão partilhada através do cálculo da média das soluções que partilham a mesma classificação, i.e. consideram-se as soluções que partilham a mesma aptidão e calcula-se um valor de aptidão partilhada.

Vejamos em pormenor o cálculo da aptidão e os diversos conceitos envolvidos.

Depois de classificar as soluções, o valor da aptidão de uma solução i pode ser calculado através da expressão 5. 1, em que $\mu(r_i)$ é o número de soluções que têm classificação r_i e N o tamanho da população.

$$f_i = N - \sum_{k=1}^{r_i-1} \mu(k) - 0.5(\mu(r_i) - 1) \quad 5.1$$

De seguida, com o objectivo de manter a diversidade, Fonseca e Fleming (1993) introduziram uma técnica de divisão em compartimentos ou nichos (*niching*) de soluções que partilham a mesma classificação.

A distância normalizada entre duas soluções com igual classificação é representada pela equação 5. 2, onde f_k^{\max} e f_k^{\min} são, respectivamente, os valores máximos e mínimos da função objectivo k . Para cada solução i é calculada a distância d_{ij} em relação a qualquer solução j que partilhe a mesma classificação. Sendo M o número de funções objectivo do problema, teremos:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{f_k^{(i)} - f_k^{(j)}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}} \quad 5.2$$

O contador de nicho é obtido pela expressão:

$$nc_i = \sum_{j=1}^{\mu(\tau_i)} Sh(d_{ij}) \quad 5.3$$

A função de partilha $Sh(d_{ij})$ dá uma indicação da proximidade de duas soluções (*sharing*).

$$Sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{part}} \right)^\alpha, & \text{se } d_{ij} < \sigma_{part}; \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad 5.4$$

No caso do MOGA esta função de partilha utiliza $\alpha=1$. O parâmetro σ_{part} representa o raio do nicho. Quando a distância $d_{ij} > \sigma_{part}$ as soluções pertencem a nichos diferentes e $Sh(d_{ij}) = 0$. Caso contrário $Sh(d_{ij})$ assume um comportamento decrescente em relação a $\frac{d_{ij}}{\sigma_{part}}$.

Por último, o valor de aptidão partilhada, f_i' , é calculado através da equação 5.5, dividindo a aptidão f_i pelo contador de nicho nc_i .

$$f_i' = \frac{f_i}{nc_i} \quad 5.5$$

Desta forma, o MOGA atribui valores de aptidão diferentes às soluções que partilham a mesma classificação. Para as soluções mais dispersas a aptidão é superior à atribuída às soluções que se encontram concentradas.

Como o MOGA apenas difere de um AG clássico na forma como é feita a atribuição da aptidão às soluções apresenta-se de seguida o algoritmo de cálculo da aptidão (Deb, 2001), com maior nível de detalhe.

PROCEDIMENTO DE ATRIBUIÇÃO DA APTIDÃO (MOGA)

Passo 1 Escolhe σ_{part} . Inicializa $\mu(j)=0$, para todas as classificações possíveis $j= 1, \dots, N$. Inicializa o contador de soluções $i=1$.

Passo 2 Calcula o número de soluções (n_i) que dominam a solução i . Calcula a classificação da solução i , $r_i=1+n_i$. Incrementa uma unidade o contador para o número de soluções que partilham a classificação r_i , $\mu(r_i)=\mu(r_i)+1$.

Passo 3 Se $i < N$, incrementa i uma unidade e vai para o passo 1. Caso contrário, vai para o passo 4.

Passo 4 Identifica a classificação máxima r^* , verificando a maior classificação r_i que tenha $\mu(r_i) > 0$. A distribuição, de acordo com a classificação e com o cálculo da aptidão média, atribui os valores de aptidão média a todas as soluções, $i=1,\dots,N$. A cada solução i com classificação $r_i=1$, a equação 5. 1 atribui uma aptidão igual a $f_i = N - 0.5(\mu(1) - 1)$, que é a média dos $\mu(1)$ valores inteiros consecutivos de N a $N-\mu(1)+1$. Coloca o contador $r=1$.

Passo 5 Para cada solução i com classificação r , calcula o contador de nicho nc_i com as outras soluções que partilham a mesma classificação, utilizando a equação 5. 3. Calcula a aptidão partilhada (equação 5. 5) e multiplica por um factor de conversão de escala, como indicado na equação 5. 6:

$$F'_i \leftarrow \frac{F_i \mu(r)}{\sum_{k=1}^{\mu(r)} F'_k} F_i \quad 5.6$$

Passo 6 Se $r < r^*$, incrementa r uma unidade, $r=r+1$ e vai para o passo 5. Caso contrário o processo está completo.

5.2.3 Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)

O Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) é um AEMO elitista proposto por Zitzler e Thiele (1998). Este algoritmo introduz o elitismo mantendo explicitamente uma população externa (PE) de tamanho fixo (N_E), na qual são guardadas as soluções não dominadas obtidas na pesquisa. Em cada geração as novas soluções não dominadas encontradas na pesquisa são comparadas com as existentes na população externa, e as soluções não dominadas resultantes são introduzidas e/ou mantidas na população externa. No entanto, o SPEA faz mais do que apenas preservar as elites; estas soluções participam, conjuntamente com a população corrente, na aplicação dos operadores genéticos, com o objectivo de influenciar a condução da população para regiões mais interessantes do espaço de pesquisa.

Inicialmente o SPEA gera aleatoriamente uma população, P_0 , de tamanho N e uma população externa, $PE_0 = \emptyset$, de tamanho máximo N_E . Em cada geração t , as soluções não dominadas (nova elite) da população P_t são copiadas para a nova população externa PE_t . Removem-se de seguida as soluções de PE_t que entretanto ficaram dominadas pela nova elite.

Com a continuação deste processo pode acontecer que o número de soluções da população externa, depois de actualizado, exceda o seu limite máximo, N_E . O SPEA incorpora, por isso, um mecanismo que permite seleccionar as soluções da população externa de modo a contar apenas N_E soluções não dominadas. No SPEA, as melhores soluções são as que estão menos agrupadas e, por isso, este algoritmo utiliza um método de agrupamentos (*clustering*), que consiste em determinar os N_E agrupamentos que melhor se distribuem pela frente não dominada. A população externa da geração seguinte é constituída por soluções que se encontram em cada um dos N_E agrupamentos, em que cada agrupamento contribui com apenas uma solução.

Depois de obtida a nova população externa, o passo seguinte consiste em calcular a aptidão da população corrente e da população externa, o que é feito de formas diferentes.

Para o caso da população externa, inicialmente atribui-se o valor de aptidão, S_i , aos seus membros. Este é proporcional ao número de indivíduos, n_i , da população corrente que a solução externa, i , domina:

$$S_i = \frac{n_i}{N + 1} \quad 5.7$$

(divide-se por $N+1$ para garantir que $S_i < 1$). Desta forma as soluções que dominam mais soluções têm maior valor de S_i .

No caso dos elementos da população corrente, o cálculo da aptidão, F_j , da solução j é feito através da expressão 5. 8, em que a solução i domina a solução j (tem-se sempre $F_j > 1$). Assim, os valores de aptidão da população corrente são sempre superiores aos da população externa. Consequentemente, quanto menor é o valor de aptidão “melhor” é o indivíduo.

$$F_j = 1 + \sum_{i \in PE_t} S_i \quad 5.8$$

Por último aplicam-se o mecanismo de selecção por torneio, usando os valores de aptidão já calculados, e os operadores genéticos cruzamento e mutação, considerando as soluções da população resultante da combinação das duas populações $PE_t \cup P_t$.

O algoritmo pode ser resumido no seguinte conjunto de passos:

ALGORITMO (SPEA)

Passo 1 Encontra o conjunto de soluções não dominadas $F_1(P_t)$ de P_t . Copia estas soluções para PE_t , $PE_t = PE_t \cup F_1(P_t)$.

Passo 2 Encontra as soluções não-dominadas $F_1(PE_t)$ da população modificada, PE_t , e apaga todas as soluções dominadas, $PE_t = F_1(PE_t)$.

Passo 3 Se $|PE_t| > NE$, usa uma técnica de agrupamentos (*clustering*) para obter uma população externa de tamanho NE . Caso contrário não altera PE_t . A população obtida é a população externa, PE_{t+1} , da próxima geração.

Passo 4 Atribui a aptidão a cada solução da elite $i \in PE_{t+1}$ utilizando a equação 5. 7. Depois atribui a aptidão a todos os elementos da população $j \in P_t$, através da expressão:

$$F_j = 1 + \sum_{i \in PE_t, i \leq j} S_i \quad 5.9$$

Passo 5 Aplica o operador selecção por torneio e os operadores cruzamento e mutação, para criar a nova população P_{t+1} de tamanho N , a partir da população combinada $PE_{t+1} \cup P_{t+1}$ (de tamanho $N + NE$).

O algoritmo prossegue até se atingir um critério de paragem escolhido.

5.2.4 Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II)

Deb et al. (2000) desenvolveram um algoritmo elitista, Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II), que usa um mecanismo de preservação e diversificação de soluções.

O algoritmo tem início com a geração aleatória de uma população P_0 , de tamanho N . Nessa população são depois identificadas várias frentes não dominadas, classificando as soluções em diferentes níveis de não dominância. A cada solução é atribuído um valor de aptidão igual ao seu nível de dominância, começando por 1 para as soluções da primeira frente (que são as soluções não dominadas da população). De seguida o NSGA II aplica um mecanismo de selecção por torneio, baseado na técnica *crowding*, aqui traduzida como de *multidões*, que será descrita à frente, de forma a preservar a diversidade da população. Por último são aplicados os operadores genéticos cruzamento e mutação, para construir uma população de descendentes, Q_0 , de tamanho N .

Depois desta fase de inicialização do algoritmo, inicia-se uma fase comum a todas as gerações (iterações) t : é criada uma terceira população Q_t , de tamanho $2N$, que é a combinação das duas populações, progenitores e descendentes, $R_t = P_t \cup Q_t$

As soluções da população resultante, R_t , são então classificadas por níveis de dominância para identificação das diferentes frentes não dominadas.

A construção da nova população, P_{t+1} , é feita a partir das várias frentes não dominadas obtidas anteriormente (com $2N$ soluções). Ao preencher a população P_{t+1} (com tamanho N) as soluções da frente 1, 2, etc., têm preferência segundo esta ordem (ver Figura 5. 3). Como o tamanho de P_{t+1} é metade do de R_t , nem todas as frentes podem ser adicionadas à nova população. Isto implica que as piores frentes sejam ignoradas e que, ao adicionar a última frente possível à nova população, o número de soluções seja maior do que o espaço que sobra em P_{t+1} . Não havendo possibilidade de adicionar a totalidade de soluções da última frente possível, quando esta frente é adicionada, em vez de simplesmente se ignorar os elementos excedentes, é usada uma estratégia baseada em distância de multidões.

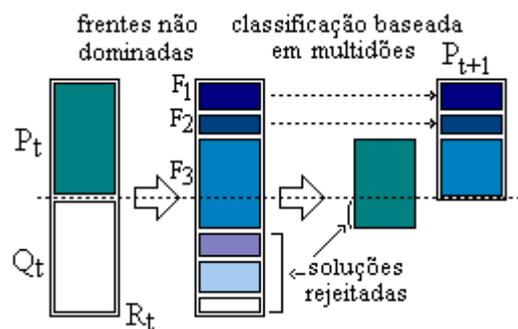


Figura 5. 3 – Preenchimento da nova população no NSGA II.

Consideremos duas soluções i e j , sujeitas a selecção por torneio baseada na técnica de multidões. A solução i ganha o torneio se:

1. Tiver melhor classificação (em termos de ordenação nas frentes não dominadas) do que a solução j : $r_i < r_j$;
2. Tiverem a mesma classificação e a solução i tiver uma distância de multidões superior à solução j : $r_i = r_j$ e $d_i > d_j$.

A distância de multidões é usada como uma estimativa da densidade de soluções na vizinhança de uma solução i . Este valor pode ser calculado de várias formas: através de um contador de nicho ou do perímetro da secção do cubóide cujos vértices são formadas pelas soluções mais próximas da solução i para todas as funções objetivo (ver Deb, 2001).

O algoritmo é descrito pelo seguinte conjunto de passos:

ALGORITMO (NSGA II)

Passo 1 Combina as populações com as soluções progenitoras e as descendentes $R_t = P_t \cup Q_t$. Realiza a classificação das soluções por níveis de dominância, identificando as diversas frentes: F_i , $i = 1, 2, \dots$, etc.

Passo 2 Inicializa uma nova população $P_{t+1} = \emptyset$. Inicializa o contador $i=1$. Até que $|P_{t+1}| + |F_i| < N$ faz $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ e $i = i + 1$.

Passo 3 Procede ao cálculo da distância de multidões (explicado a seguir) para realizar o procedimento *crowding sort*, ($F_i < c$) e inclui as $(N - |P_{t+1}|)$ soluções mais dispersas utilizando os valores de distância de multidões nas fronteiras classificadas F_i em P_{t+1} .

Passo 4 Cria a população de descendentes Q_{t+1} a partir de P_{t+1} , através da selecção por torneio por multidões, e operadores de cruzamento e mutação.

O algoritmo que permite fazer o cálculo da distância de multidões pode ser resumido nos seguintes passos:

CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE MULTIDÕES (*crowding sort*, ($F_i < c$))

Passo 1 O número de soluções em F é $l = |F|$. Para cada solução na fronteira F atribui $d_i = 0$.

Passo 2 Para cada função objectivo $m = 1, 2, \dots, M$, ordena as soluções de forma decrescente em relação a f_m , ou calcula o vector de índices ordenados: $I^m = \text{sort}(f_m, >)$.

Passo 3 Para cada um dos objectivos $m = 1, 2, \dots, M$, atribui uma distância grande às soluções extremas $d_{I_1^m} = d_{I_l^m} = \infty$, e para todas as outras soluções $j = 2, \dots, (l - 1)$, atribui:

$$d_{I_j^m} = d_{I_j^m} + \frac{f_m(I_{j+1}^m) - f_m(I_{j-1}^m)}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad 5.10$$

O índice I_j^m representa a j -ésima solução na lista ordenada pelo objectivo m . Assim I_1^m e I_l^m representam os elementos da lista com menor e maior valor em relação a um objectivo m .

$f_m(I_{i+1}^m)$ e $f_m(I_{i-1}^m)$ são os valores dos vizinhos de i na m -ésima função objectivo. f_m^{\max} e f_m^{\min} são os limites máximo e mínimo em cada objectivo. A equação 5.10 assegura que as soluções mais afastadas tenham d_i maior.

A distância de multidões de uma solução i , d_i , representa uma estimativa do perímetro da secção cubóide cujos vértices são os seus vizinhos mais próximos, ver Figura 5.4.

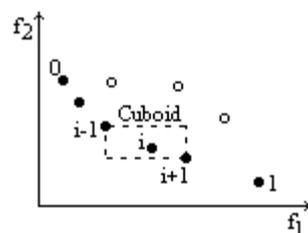


Figura 5.4 – Cálculo da distância de multidão (Deb, 2001).

5.3 OPÇÕES NA APLICAÇÃO DOS AEMO SELECIONADOS AO PROBLEMA

5.3.1 Representação das Soluções

Quando se pretende aplicar um algoritmo baseado em AE, é necessário criar uma ligação entre o contexto do problema original e o espaço de resolução onde se desenrola o processo evolucionário. Este mecanismo que permite estabelecer a correspondência entre o espaço de soluções do problema original e um conjunto de indivíduos designa-se por *representação*. A representação que corresponde à ideia original proposta por Holland (Holland, 1975) utiliza o alfabeto binário, mas esta não é a única opção possível. Surgiram entretanto outro tipo de representações, com números reais, números inteiros e até caracteres, uma vez que em algumas circunstâncias outro tipo de representação, diferente da binária, traz vantagens em termos de precisão ou de diminuição do esforço computacional.

A opção feita para o problema tratado neste trabalho é a de representar cada solução por um vector de números inteiros “dividido” em duas partes distintas de igual dimensão. O tamanho do vector depende do número limite de nós que se pretendem compensar. Se, por exemplo, se definir o número máximo de barramentos a compensar como N , o vector terá o tamanho $T=2N$. A primeira parte do vector guarda em cada célula o número dos nós compensados por ordem crescente, por facilidade de manipulação computacional, e a segunda parte do vector guarda o tipo de condensador correspondente.

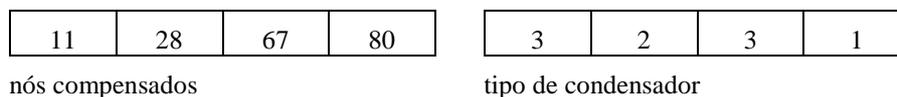


Figura 5.5 – Estrutura de um indivíduo.

Consideramos um exemplo, Figura 5.5, em que o número máximo de nós que se podem compensar é $N=4$; assim, o vector é composto por oito células, $T=8$. Nas primeiras quatro estão guardadas as posições em que se encontram os condensadores; no exemplo são os nós 11, 28, 67 e 80. Nas últimas quatro células estão guardados os tipos de condensadores, que correspondem a uma determinada capacidade em KVar, que são colocados em cada uma das posições da rede identificadas na primeira parte do vector. No exemplo são colocados condensadores do tipo 3 nos nós 11 e 67, um condensador do tipo 2 no nó 28 e um condensador do tipo 1 no nó 80.

Esta forma de representação revelou-se eficaz do ponto de vista algorítmico e uma boa opção em relação ao esforço computacional envolvido.

5.3.2 Geração de Soluções Iniciais e População

Como foi referido no capítulo 3, num algoritmo baseado em processos evolucionários um dos aspectos mais importantes é o tamanho da população, uma vez que este pode afectar a qualidade das soluções obtidas e o tempo de processamento do algoritmo.

Populações pequenas têm a vantagem de ser computacionalmente menos exigentes. No entanto, os seus elementos apresentam geralmente pouca diversidade genética o que pode levar à convergência prematura e a má qualidade das soluções finais obtidas. As populações grandes, por seu lado, contribuem para ultrapassar o inconveniente da falta diversidade mas têm um custo geralmente mais elevado em tempo de processamento.

No presente caso, testaram-se populações de vários tamanhos, desde 10 soluções até 100 soluções. Os resultados apresentados por populações com menos de 40 elementos apresentaram sempre uma frente de *Pareto* mal caracterizada, devido à concentração de soluções só em determinadas áreas. Populações entre 40 e 60 elementos foram as que se revelaram um melhor compromisso, em termos de tempo de cálculo, de definição da fronteira e de qualidade dos resultados obtidos. Populações acima de 70 elementos tornaram-se muito difíceis de trabalhar devido ao tempo de cálculo computacional, não existindo diferenças significativas nos resultados.

O conjunto de soluções iniciais é gerado aleatoriamente.

5.3.3 Avaliação das Soluções, Seleção e Operadores Genéticos

A avaliação de soluções consiste na associação de valores (aptidão) aos indivíduos de uma população correspondentes à sua proficiência na resolução de um problema; a aptidão atribuída permite depois seleccionar os indivíduos que mais se adequam à aplicação dos operadores genéticos, recombinação e mutação. No caso das aplicações baseadas em AEMO, desenvolvidas para o estudo do problema da compensação da energia reactiva em redes radiais de distribuição, os algoritmos utilizados apresentam já mecanismos de avaliação e selecção das soluções e estes foram os adoptados no desenvolvimento das aplicações. A apresentação final das soluções é sempre feita recorrendo à frente de *Pareto* obtida.

Em relação ao cruzamento e mutação, respeitam-se as opções dos algoritmos aplicados, mas considerando o seguinte: a ordenação das células, na primeira parte do vector, é sempre crescente. Assim, assumindo que depois de uma operação de cruzamento ou de mutação obtemos um vector como o mostrado na Figura 5.6, é necessário reordenar o vector de forma a obter um indivíduo com as características necessárias para pertencer à população, como se mostra na Figura 5.7, tendo em atenção continuar a manter a correspondência relativamente ao condensador seleccionado para cada nó.

25	7	67	80	2	3	2	1
nós compensados				tipo de condensador			

Figura 5.6 – Vector após cruzamento e/ou mutação, antes de ser ordenado.

7	25	67	80	3	2	2	1
nós compensados				tipo de condensador			

Figura 5.7 – Vector após cruzamento e/ou mutação, depois de ser ordenado.

5.4 NSGA-II E PESQUISA DE VIZINHANÇA

A qualidade das soluções encontradas é avaliada segundo dois critérios:

- a fronteira de *Pareto* domina totalmente ou quase na totalidade a fronteira apresentada pelos outros algoritmos;
- as soluções que formam a fronteira de *Pareto* apresentam maior diversidade e definição da fronteira, em comparação com as soluções apresentadas pelos outros algoritmos.

De acordo com estes critérios, o algoritmo NSGA-II padrão foi o que apresentou melhores soluções quando aplicado ao problema de colocação de condensadores em redes radiais de distribuição, como será detalhado no capítulo onde se apresentam os resultados. Devido a este comportamento, seleccionou-se este algoritmo para se experimentarem algumas modificações ao próprio algoritmo, com o objectivo de o tornar mais adaptado ao tipo de problema em estudo.

Tal como se descreveu anteriormente, o problema da colocação de condensadores em redes radiais de distribuição é de natureza combinatória. Existem vários locais para a colocação dos condensadores e vários tipos de condensadores que se podem combinar numa multiplicidade de configurações possíveis.

Tirando partido destas características decidiu-se modificar o NSGA II original, introduzindo uma pesquisa adicional na vizinhança das soluções encontradas pelo algoritmo, como se descreve seguidamente.

Foram testadas diversas pesquisas de vizinhança, até se encontrar a que melhor se adaptou ao problema considerando também o tempo de cálculo computacional, que em problemas de natureza combinatória rapidamente atinge valores elevados.

Consideraram-se três tipos de espaços de pesquisa em torno das soluções.

O primeiro espaço de pesquisa na vizinhança das soluções é obtido através da alteração dos condensadores colocados nos nós. Consideremos, por exemplo, que existem três tipos possíveis de condensadores (1, 2, 3), e que temos uma solução como a do exemplo descrito na Figura 5.7. A vizinhança dessa solução é definida como se descreve na Figura 5.8.

Solução Original:

7	25	67	80
---	----	----	----

3	2	2	1
---	---	---	---

Vizinhança

7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80

2	2	2	1
1	2	2	1
3	1	2	1
3	3	2	1
3	2	1	1
3	2	3	1
3	2	2	2
3	2	2	3

Figura 5.8 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos condensadores.

Solução Original:

7	25	67	80
---	----	----	----

3	2	2	1
---	---	---	---

Vizinhança:

6	25	67	80
8	25	67	80
7	24	67	80
7	26	67	80
7	25	66	80
7	25	68	80
7	25	67	79
7	25	67	81

3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1

Figura 5.9 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos locais.

Outro espaço de pesquisa na vizinhança das soluções que foi testado, é o obtido através da alteração dos locais onde são colocados os condensadores, explorando as posições vizinhas dos locais seleccionados. Consideremos mais uma vez a solução como a do exemplo descrito na Figura 5.7. A vizinhança dessa solução é definida como se descreve na Figura 5.9.

Por último, considerou-se uma vizinhança mais alargada, juntando as duas pesquisas: a de condensadores e a de locais contíguos aos que foram seleccionados para se colocarem os condensadores, tal como se descreve na Figura 5.10, considerando como exemplo a solução descrita na Figura 5.7.

Solução Original:

7	25	67	80
---	----	----	----

3	2	2	1
---	---	---	---

Vizinhança

7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
7	25	67	80
6	25	67	80
8	25	67	80
7	24	67	80
7	26	67	80
7	25	66	80
7	25	68	80
7	25	67	79
7	25	67	81

2	2	2	1
1	2	2	1
3	1	2	1
3	3	2	1
3	2	1	1
3	2	3	1
3	2	2	2
3	2	2	3
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1
3	2	2	1

Figura 5.10 – Soluções que se encontram na vizinhança da solução da Figura 5.7, por alteração dos condensadores e dos locais.

A pesquisa em torno da vizinhança das soluções encontradas pelo NSGA-II que melhores resultados obteve foi esta última, mas com um maior tempo de processamento computacional devido a ser a uma vizinhança muito alargada devido ao aumento do número de combinações possíveis.

Apesar do tempo de processamento desta última opção ser maior, os resultados são francamente superiores. Como já se referiu o tempo de processamento não é relevante neste problema, uma vez que é um problema de planeamento, e frente a uma melhoria notória de resultados optou-se por adoptar esta última definição de vizinhança.

Em relação ao conjunto de soluções sobre o qual recai a pesquisa de vizinhança, fizeram-se vários testes. Inicialmente a pesquisa de vizinhança começou por ser efectuada sobre todas as soluções descendentes de uma geração, após selecção, cruzamento e mutação, como mais um operador. Esta opção revelou-se muito pesada e consumidora de tempo de processamento computacional, sem que houvesse grande alteração nos resultados finais. Por isso abandonou-se e optou-se por fazer a pesquisa sobre as soluções seleccionadas para serem a população da iteração seguinte.

A pesquisa que revelou melhores resultados foi a que é feita após a selecção das soluções que serão as progenitoras da próxima geração. Se em torno de uma solução desta população aparecer, por pesquisa de vizinhança conforme descrito, alguma solução vizinha que a domine, a solução dominada é substituída pela solução vizinha que apresenta melhores características. O conjunto de soluções que seguem para a próxima iteração não será, assim, o conjunto de soluções seleccionado, mas um conjunto em que algumas das soluções seleccionadas foram substituídas por outras com diferenças ligeiras, mas que apresentam melhor desempenho para o problema em causa.

Assim, podemos afirmar que a opção em que se obteve melhores resultados, sem comprometer de forma grave o tempo de processamento computacional, foi aquela em que se realizou pesquisa apenas na vizinhança das soluções progenitoras da geração seguinte, e em que a vizinhança foi definida como sendo aquela que é obtida por alteração da capacidade dos condensadores, através do teste de todas as opções possíveis de capacidade, e por alteração dos locais onde são colocados os condensadores para os locais vizinhos dos seleccionados. Com este procedimento consegue-se aperfeiçoar as boas soluções já obtidas, através do teste de combinações próximas daquelas seleccionadas pelo NSGA-II. Assim, esta alteração feita ao NSGA-II revelou-se bem adaptada ao problema aqui tratado.

5.5 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste capítulo a descrição dos algoritmos testados na resolução do problema tratado neste trabalho. Foram escolhidos, tal como se indicou, AEMO com características diferentes, elitistas e não elitistas, Deb (2001). Os resultados obtidos com estes algoritmos são explorados no próximo capítulo.

Mostraram-se também algumas das opções necessárias para aplicar estes algoritmos ao problema, nomeadamente o tipo de estrutura utilizada para representar as soluções e o tamanho da população. Tal como foi referido, em relação aos operadores genéticos seguiram-se as sugestões dos algoritmos originais.

Descreveu-se a alteração feita ao NSGA II que se mostrou mais adequada ao problema aqui tratado.

6

TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se um estudo comparativo com os resultados apresentados num artigo, Das (2008), que utiliza uma rede de teste apresentada em Baran e Wu (1989), e habitualmente usada como rede de teste em trabalhos publicados nesta área de investigação. O estudo é feito comparando os resultados obtidos por três abordagens: a proposta em Das (2008), NSGA II padrão, e NSGA II com pesquisa de vizinhança.

São também apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos AEMO padrão e do algoritmo NSGA II modificado, descritos no capítulo 5, a uma rede real portuguesa. Para esta rede expõem-se os resultados comparativos entre os diversos algoritmos testados.

O modelo matemático, descrito no capítulo 4, incorpora explicitamente duas funções objectivo: minimizar o custo de instalação dos equipamentos de compensação e minimizar as perdas na rede eléctrica de distribuição. No estudo realizado com a rede da EDP são visíveis as vantagens da utilização de um modelo MO e de abordagens compatíveis com esta característica do problema. No entanto, para se fazerem as comparações com resultados de Das (2008) foi necessário efectuar cálculos adicionais semelhantes aos indicados no artigo, entre os quais o da poupança em energia num ano, assim como uma análise semelhante à exposta nesse texto sobre o custo-benefício da instalação dos condensadores.

6.2 REDE RETIRADAS DA BIBLIOGRAFIA

Baran e Wu (1989) apresentam um dos trabalhos mais citados sobre o problema da localização de condensadores em redes radiais de distribuição de energia eléctrica. Para além de ser um trabalho referenciado pela abordagem proposta nesta dissertação, ele fornece também os dados de uma rede eléctrica posteriormente utilizada por outros autores como rede de teste e/ou para estudos comparativos. Não havendo redes radiais de teste normalizadas para se realizarem estudos comparativos neste tipo de problemas, esta rede tem sido utilizada para fazer comparações de resultados obtidos por diferentes abordagens. O problema exposto em Baran e Wu (1989) consiste em determinar a localização e a dimensão dos condensadores que devem ser colocados na rede de distribuição com a intenção de reduzir perdas, em potência e em energia, e preservar a tensão nos níveis desejados, minimizando o custo da instalação dos condensadores. A perspectiva que estes autores têm sobre o problema é, assim, muito semelhante à adoptada no presente trabalho, embora o modelo matemático proposto na altura seja bastante simplificado.

Os testes conduzidos pelos autores, apresentados em Baran e Wu (1989), foram realizados sobre duas redes. Uma das redes tem apenas 10 nós num único alimentador, tendo sido originalmente apresentada em Grainger e Lee (1981) e serviu para comparar os resultados obtidos por ambas as abordagens. Esta rede de 10 nós aparece também como rede de teste em alguns trabalhos, tal como em Chin e Lin (1994), Santos et al. (2004), Chiou et al. (2004), entre outros, mas não é uma rede muito interessante do ponto de vista de aplicação por ser demasiado simples com um único alimentador. A outra rede tem 69 nós, distribuídos por um alimentador principal e 9 ramos laterais. Foi originalmente proposta por Baran e Wu (1989), mas posteriormente tem sido utilizada por muitos trabalhos, entre os quais se destacam os de Santos et al. (2004), Huang et al. (1996), Ghose et al. (1999), Milošević e Begović (2004) e Das (2008), com a intenção de estabelecer comparação de resultados ou apenas como rede de teste.

6.2.1 Características da Rede de 69 Nós

Seleccionou-se a rede de 69 nós, já referida, para realizar o estudo comparativo. Na Figura 6.1 e nas Tabela 6.1 e Tabela 6.2 descreve-se a sua topologia e a carga nominal a que esta rede está sujeita. Os resultados obtidos são comparados com os resultados obtidos por Das (2008). Este é o estudo mais recente que se encontra publicado e que utiliza esta rede. Este trabalho também foi seleccionado devido à possibilidade de replicar o estudo, uma vez que disponibiliza informação suficiente para o efeito. Das (2008) utiliza uma abordagem com lógica difusa e AG para resolução do problema da colocação de condensadores em redes radiais.

Foram ainda considerados os seguintes dados:

- cada banco de condensadores tem capacidade 100 KVAR, e o número máximo de bancos permitidos por nó é de 20. Desta forma a compensação pode variar entre 100 e 2000 KVAR por nó.
- Custo da energia, $K_e=0.06$ (US \$/kWh).
- Custo dos condensadores, $K_c=3$ (US \$/kVAR).
- A tensão na SE é considerada 1.0 pu
- Os limites máximo e mínimo da tensão nos nós são de 1.1 p.u. e 0.9 p.u., respectivamente.
- Tensão de base 12.66 kV e potência de base 10 kVA.
- Número máximo de barramentos compensados: 3.

Tabela 6.1 – Potência solicitada nos barramentos (rede Baran e Wu (1989)).

Nó	$P(KW)+j*Q(KVAR)$	Nó	$P(KW)+j*Q(KVAR)$	Nó	$P(KW)+j*Q(KVAR)$
1	$0 + j * 0$	24	$28 + j * 20$	47	$0 + j * 0$
2	$0 + j * 0$	25	$0 + j * 0$	48	$79 + j * 56,4$
3	$0 + j * 0$	26	$14 + j * 10$	49	$384,7 + j * 274,5;$
4	$0 + j * 0$	27	$14 + j * 10$	50	$384,7 + j * 274,5;$
5	$0 + j * 0$	28	$26 + j * 18,6$	51	$40,5 + j * 28,3$
6	$2,6 + j * 2,2$	29	$26 + j * 18,6$	52	$3,6 + j * 2,7$
7	$40,4 + j * 30$	30	$0 + j * 0$	53	$4,35 + j * 3,5$
8	$75 + j * 54$	31	$0 + j * 0$	54	$26,4 + j * 19$
9	$30 + j * 22$	32	$0 + j * 0$	55	$24 + j * 17,2$
10	$28 + j * 19$	33	$14 + j * 10$	56	$0 + j * 0$
11	$145 + j * 104$	34	$19,5 + j * 14$	57	$0 + j * 0$
12	$145 + j * 104$	35	$6 + j * 4$	58	$0 + j * 0$
13	$8 + j * 5$	36	$26 + j * 18,55$	59	$100 + j * 72$
14	$8 + j * 5$	37	$26 + j * 18,55$	60	$0 + j * 0$
15	$0 + j * 0$	38	$0 + j * 0$	61	$1244 + j * 888$
16	$45 + j * 30$	39	$24 + j * 17$	62	$32 + j * 23$
17	$60 + j * 35$	40	$24 + j * 17$	63	$0 + j * 0$
18	$60 + j * 35$	41	$1,2 + j * 1$	64	$227 + j * 162$
19	$0 + j * 0$	42	$0 + j * 0$	65	$59 + j * 42$
20	$1 + j * 0,60$	43	$6 + j * 4,3$	66	$18 + j * 13$
21	$114 + j * 81$	44	$0 + j * 0$	67	$18 + j * 13$
22	$5 + j * 3,5$	45	$39,22 + j * 26,3;$	68	$28 + j * 20$
23	$0 + j * 0$	46	$39,22 + j * 26,3;$	69	$28 + j * 20$

Tabela 6.2 – Resistência e reactância dos alimentadores (rede Baran e Wu (1989)).

Nó Partida	Nó Chegada	$R + j * X (\Omega)$	Nó Partida	Nó Chegada	$R + j * X (\Omega)$
1	2	0,0005 + j * 0,0012	3	36	0,0044+ j * 0,0108
2	3	0,0005 + j * 0,0012	36	37	0,0640+ j * 0,1565
3	4	0,0015 + j * 0,0036	37	38	0,1053 + j * 0,1230
4	5	0,0251 + j * 0,0294	38	39	0,0304 + j * 0,0355
5	6	0,3660 + j * 0,1864	39	40	0,0018 + j * 0,0021
6	7	0,3810 + j * 0,1941	40	41	0,7283 + j * 0,8509
7	8	0,0922 + j * 0,0470	41	42	0,3100 + j * 0,3623
8	9	0,0493 + j * 0,0251	42	43	0,0410 + j * 0,0478
9	10	0,8190 + j * 0,2707	43	44	0,0092 + j * 0,0116
10	11	0,1872 + j * 0,0619	44	45	0,1089 + j * 0,1373
11	12	0,7114 + j * 0,2351	45	46	0,0009 + j * 0,0012
12	13	1,0300 + j * 0,3400	4	47	0,0034 + j * 0,0084
13	14	1,0440 + j * 0,3400	47	48	0,0851 + j * 0,2083
14	15	1,0580 + j * 0,3496	48	49	0,2898 + j * 0,7091
15	16	0,1966 + j * 0,650	49	50	0,0822 + j * 0,2011
16	17	0,3744 + j * 0,1238	8	51	0,0928 + j * 0,0473
17	18	0,0047 + j * 0,0016	51	52	0,3319 + j * 0,114
18	19	0,3276 + j * 0,1083	9	53	0,1740 + j * 0,0886
19	20	0,2106 + j * 0,0690	53	54	0,2030 + j * 0,1034
20	21	0,3416 + j * 0,1129	54	55	0,2842 + j * 0,1447
21	22	0,0140 + j * 0,0046	55	56	0,2813 + j * 0,1433
22	23	0,1591 + j * 0,0526	56	57	1,5900 + j * 0,5337
23	24	0,3463 + j * 0,1145	57	58	0,7837 + j * 0,2630
24	25	0,7488 + j * 0,2475	58	59	0,3042 + j * 0,1006
25	26	0,3089 + j * 0,1021	59	60	0,3861 + j * 0,1172
26	27	0,1732 + j * 0,0572	60	61	0,5075 + j * 0,2585
3	28	0,0044+ j * 0,0108	61	62	0,0974 + j * 0,0496
28	29	0,0640+ j * 0,1565	62	63	0,1450 + j * 0,0738
29	30	0,3978 + j * 0,1315	63	64	0,7105 + j * 0,3619
30	31	0,0702 + j * 0,0232	64	65	1,0410 + j * 0,5302
31	32	0,3510+ j * 0,1160	11	66	0,2012+ j * 0,0611
32	33	0,8390 + j * 0,2816	66	67	0,0047 + j * 0,0014
33	34	1,7080 + j * 0,5646	12	68	0,7394 + j * 0,2444
34	35	1,4740 + j * 0,4873	68	69	0,0047 + j * 0,0016

A curva de duração de carga pode ser traçada a partir da Tabela 6.3. Os custos em perdas de energia e a tensão mínima nos barramentos do sistema sem compensação para os vários níveis de carga (vazio, média e ponta) são dados na Tabela 6.4..

Tabela 6.3 – Curva de duração de carga (rede Baran e Wu (1989)).

	Vazio	Média	Ponta
Nível de Carga	0,5	1	1,6
Duração (h/ano)	2000	5260	1500

Tabela 6.4 – Custo das perdas em energia e tensão mínima nos barramentos da rede sem compensação (rede Baran e Wu (1989)).

Nível de carga	Vazio	Média	Ponta
Custo das perdas de energia (US\$)	6 192	70 997	58 716
Tensão mínima no sistema (p.u.)	0,95668	0,90919	0,84449

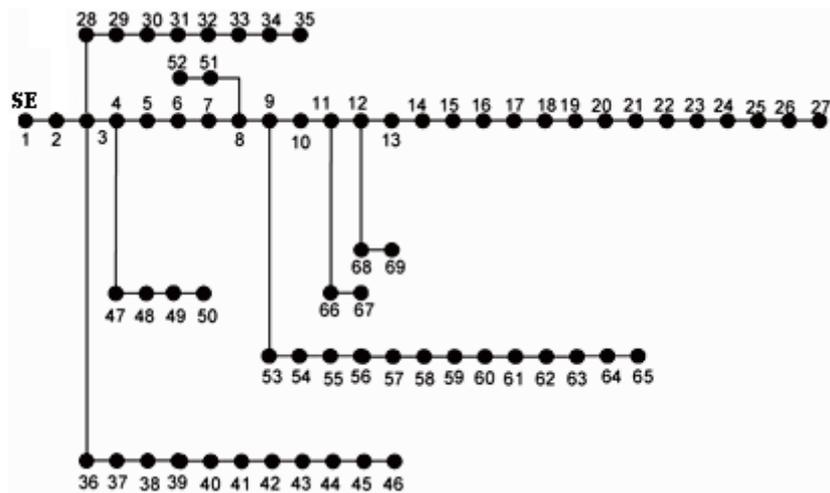


Figura 6.1 – Topologia da rede (rede Baran e Wu (1989)).

6.2.2 Resultados e Comparações Utilizando a Rede Retirada da Bibliografia

No trabalho publicado em Das (2008), o autor reconhece que o problema tem várias funções objectivo, referindo-se a ele como sendo um problema MO. No entanto, o modelo utilizado em Das (2008) não é MO, e embora o autor reconheça dois objectivos distintos, um referente aos custos e outro ao perfil da tensão, estes são depois combinados numa única função objectivo.

A primeira parte da função objectivo apresentada refere-se aos custos devido às perdas em energia activa no sistema. Tal como em Baran e Wu (1989), Das (2008) propõe a utilização de um diagrama de duração de carga, ver Tabela 6.3. Estes dados são depois necessários para calcular o custo das perdas em energia, através da multiplicação das perdas em potência activa num determinado intervalo pela duração desse intervalo.

A segunda parte da função objectivo em Das (2008) considera os limites de tensão que é necessário respeitar, sendo integrada na função objectivo, juntamente com o primeiro objectivo referido anteriormente, através de um factor de penalização. O autor refere-se a estas duas partes da função objectivo como sendo dois objectivos distintos mas eles ficam associados numa única função objectivo. O autor indica que esta parcela também pode ser considerada como uma restrição.

Como o modelo utilizado por este autor não é MO, a comparação entre os resultados obtidos pelas diferentes abordagens, a de Das (2008) e as baseadas em AEMO, não pode ser feita directamente. Para se poder estabelecer a comparação entre soluções obtidas com o NSGA II, o NSGA II com pesquisa de vizinhança e a abordagem baseada em lógica difusa e AG proposta em Das (2008), foi necessário escolher uma única solução de cada um dos conjuntos de soluções não dominadas obtidos pelas duas primeiras abordagens.

As fronteiras de Pareto das abordagens MO foram obtidas considerando o pior cenário de carga (ponta). Com estas condições de carga foram estabelecidos os locais e dimensão das baterias de condensadores a colocar. De notar que a ponta proposta pelo autor é muito elevada, 60% mais do que a carga nominal, o que fez com que os valores do perfil de tensão da rede descessem para níveis muito baixos.

Para se conhecer a operação das baterias de condensadores, i.e. o valor assumido pela compensação nos locais escolhidos em condições de carga média (ou nominal) e em vazio, foi necessário fixar os locais compensados de acordo com a solução dada para a ponta. Depois realizou-se a pesquisa dos melhores valores de compensação para aquelas condições de carga considerando a perspectiva da redução de perdas, uma vez que os custos foram fixados quando se seleccionou a dimensão das baterias e a sua localização para condições de ponta. Neste caso, para se seleccionar o valor de compensação houve necessidade de alterar os objectivos, uma vez que o valor assumido pela função relativa ao custo já estava estabelecido.

Por isso, a compensação para carga nominal e vazio foi estabelecida tendo apenas em conta a redução de perdas.

Após estas duas etapas obtivemos os locais e a compensação, conforme se mostra na Tabela 6.5. Nas tabelas comparativas aqui apresentadas foi necessário identificar as soluções encontradas pelas três abordagens e optou-se pela seguinte designação:

A – Solução proposta em Das (2008).

B – Solução seleccionada do conjunto de soluções não dominadas obtidas com o NSGA II.

C – Solução seleccionada do conjunto de soluções não dominadas obtidas com o NSGA II com pesquisa de vizinhança.

Na Tabela 6.5, podemos observar que enquanto a abordagem sugerida em Das (2008) compensa os barramentos todos, i.e. três barramentos (59, 61 e 64) no mesmo alimentador, que é sem dúvida um alimentador muito sobrecarregado, as abordagens baseadas em NSGA II não só compensam esse alimentador, como também propõem a compensação de um barramento no alimentador principal, e com isso obtêm melhores resultados. O NSGA II com pesquisa de vizinhança impõe uma compensação muito elevada no referido alimentador mas em apenas dois locais.

Devido às características da rede, com um barramento (o 61) sujeito a uma carga mil vezes superior a grande parte dos barramentos da rede e com um número máximo de barramentos compensados muito baixo (apenas 3), pode dizer-se que os resultados são muito condicionados pelas características impostas inicialmente.

Tabela 6.5 – Resultados selecção do local e dimensão dos condensadores.

Localização óptima			Compensação segundo o nível de carga (kVAr)									Tamanho óptimo		
			Ponta			Média			Vazio					
A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
59	19	20	1100	400	400	100	200	200	0	100	200	1100	400	400
61	62	61	800	1400	1900	700	1000	500	0	400	500	800	1400	1900
64	64	64	1200	1400	1000	800	200	100	300	100	100	1200	1400	1000

Considerando os valores apresentados na Tabela 6.6, podemos verificar que a solução conseguida pelo NSGA II com pesquisa de vizinhança consegue reduzir o custo total de exploração anual da rede (custo das perdas em energia num ano menos o custo do investimento em condensadores) em 36 711 (US \$), enquanto a abordagem proposta por Das (2008) reduz em apenas 30 878 (US \$), uma diferença de cerca seis mil dólares americanos por ano, segundo os valores considerados. Embora o custo dos condensadores a colocar proposto pelo NSGA II com pesquisa de vizinhança seja mais elevado, mais 600 US \$ do que o custo de compensação sugerido em Das (2008), esse investimento traduz-se depois em redução de perdas que compensam o investimento inicial.

Em relação aos valores da tensão foi necessário ter em conta o seguinte. O algoritmo para o cálculo do trânsito de potência utilizado por Das (2008) não é tão preciso como o desenvolvido e utilizado nesta dissertação. Ao calcular o trânsito de potência com os dados das soluções propostas em Das (2008) obtêm-se valores de tensão ligeiramente abaixo daqueles apresentados no artigo. Por exemplo, em situação de ponta a solução proposta por Das (2008) e indicada no artigo publicado como apresentando uma tensão mínima no barramento 65 de 0,90014 p.u., apresenta com o cálculo mais preciso 0,89698 p.u. Devido a esta pequena diferença de cálculo, e para se estabelecer a comparação em situação de igualdade com Das (2008), considerou-se que a tensão mínima aceitável para os barramentos do sistema era de 0,897 p.u., em vez de 0,9 p.u.. Os valores de tensão apresentados nas tabelas deste capítulo para o perfil de compensação sugerido em Das (2008) foram calculados com o método de cálculo do trânsito de potência proposto nesta dissertação, e diferem ligeiramente dos que surgem no artigo original devido ao que anteriormente foi explicado.

Tabela 6.6 – Comparação dos custos com e sem condensadores.

Custos (US \$)	Sem condensadores	A	B	C
Total	135 905	105 027	100 083	99 194
Perdas em energia	135 905	95 727	90 483	89 294
Condensadores	0	9 300	9 600	9 900

A ponta considerada, muito elevada em relação à carga nominal, assim como um número tão baixo de locais a compensar, fez com que o número de soluções encontradas pelos algoritmos NSGA II e NSGA II com pesquisa de vizinhança fosse muito reduzido. Isto acontece porque a maior parte das soluções são não admissíveis devido à tensão não atingir o mínimo requerido, principalmente no ramo que apresenta uma carga muito acima da existente no resto da rede de distribuição. De notar que sem compensação a tensão mínima apresentada pela rede chega a atingir 0,8444 p.u., o que é um valor muito baixo. Experimentou-se também testar os

algoritmos para carga nominal e a fronteira de Pareto nesta situação é preenchida e extensa, uma vez que as soluções são todas admissíveis, mesmo sem compensação.

As Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4 mostram uma análise comparativa do perfil de tensões ao longo da rede obtido pelas três abordagens.

Como se pode observar nestas figuras, principalmente nas situações de ponta e vazio, a abordagem baseada em NSGA II com pesquisa de vizinhança obtém um perfil de tensões mais regular ao longo da rede e mais próximo da tensão desejada, 1 p.u.. Nestes gráficos também se pode ver que a carga imposta ao barramento 61, cerca de mil vezes superior à existente noutros pontos da rede, condiciona de forma evidente o perfil de tensões nesse barramento e nos que se encontram nas suas proximidades, principalmente a jusante do mesmo.

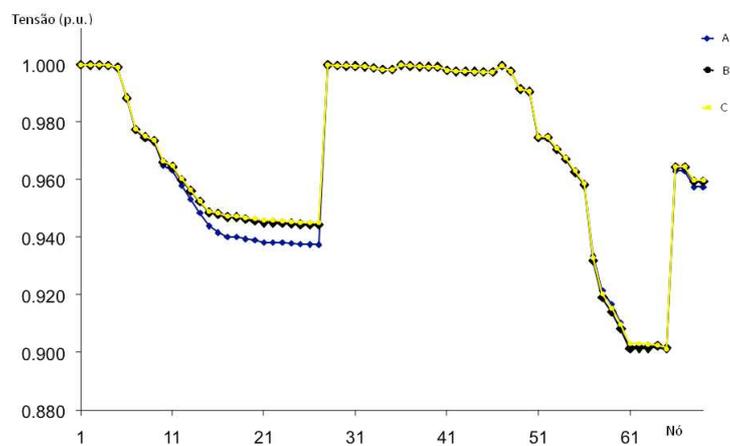


Figura 6.2 – Perfil de tensões ao longo da rede com carga de ponta.

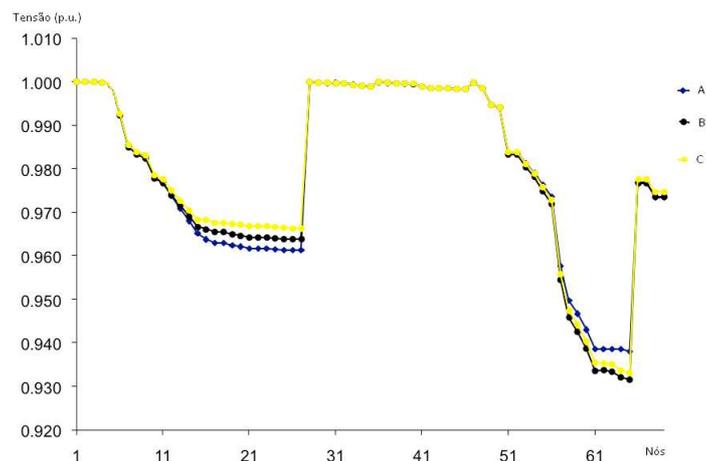


Figura 6.3 – Perfil de tensões ao longo da rede com carga nominal.

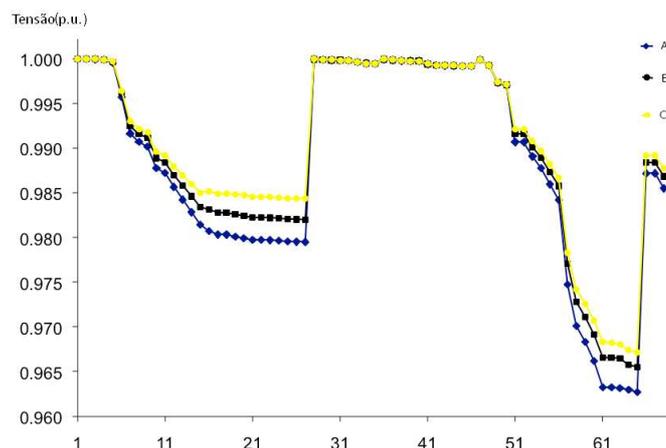


Figura 6.4 – Perfil de tensões ao longo da rede em vazio.

Na Tabela 6.7 é apresentada a comparação para várias situações de carga e para as três abordagens, considerando agora a tensão mínima apresentada pela rede (barramento 65) e as perdas na rede. Como se pode ver, a tensão mínima admissível considerada é de 0,897, pelas razões já anteriormente referidas, e a abordagem que apresenta melhores resultados é o NSGA II com pesquisa de vizinhança.

Tabela 6.7 – Comparação da tensão e perdas com e sem condensadores.

Nível de Carga	Tensão/Perdas	Sem condensadores	Com condensadores		
			A	B	C
Ponta	V_{\min}^{65} (p.u.)	0,84449	0,89698	0,89747	0,89752
	Perdas (kW)	652,4	460,4	450,5	445,7
Média	V_{\min}^{65} (p.u.)	0,90919	0,93693	0,93042	0,93559
	Perdas (kW)	224,96	153,3	144,9	142,9
Vazio	V_{\min}^{65} (p.u.)	0,95668	0,96220	0,96504	0,96757
	Perdas (kW)	51,6	40,3	35,1	34,1

A abordagem de Das (2008) não é MO; no entanto, as abordagens estudadas nesta dissertação permitem encontrar várias soluções não dominadas para o problema e, por isso, apresentam-se a seguir as fronteiras de Pareto obtidas que nos permitem também adquirir outra visão deste caso em particular.

Como já foi referido, este caso apresenta uma sobrecarga evidente de um barramento num dos ramos da rede, um número máximo de barramentos que é permitido compensar muito pequeno relativamente à extensão da rede e condições de ponta muito pesadas face à carga nominal. Estas circunstâncias condicionam os resultados obtidos principalmente quando a rede está sujeita à carga máxima, e as fronteiras de Pareto surgem com um número de

soluções reduzido como se pode ver na Figura 6.5. Nesta figura também se destacam as soluções seleccionadas para realizar o estudo comparativo com Das (2008).

Cada uma destas soluções representa um compromisso entre aquilo que o decisor pretende investir e a redução de perdas em potência no sistema. Utilizando os dados de Das (2008), as melhores soluções são as assinaladas. No entanto, há muitos factores que pesam quando se tomam decisões, e a apresentação clara dos compromissos existentes entre diversas soluções é de grande interesse para quem decide.

De notar que ambos os algoritmos encontram a solução mais cara e que reduz mais as perdas do sistema (432 kW, 18 000 US \$). Esta solução coloca o máximo de baterias (20) em três nós da rede, e os nós onde se localiza a compensação coincidem nas soluções dos dois algoritmos.

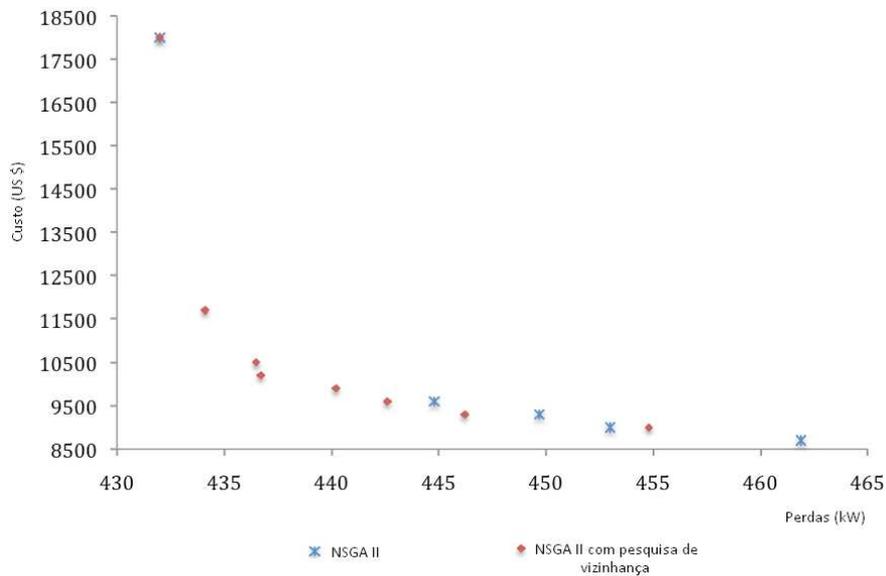


Figura 6.5 – Fronteiras de Pareto obtidas pelos algoritmos NSGA II e NSGA II com pesquisa de vizinhança, e soluções seleccionadas.

6.3 REDE ELÉCTRICA DA EDP DISTRIBUIÇÃO

A rede eléctrica real utilizada faz parte do sistema eléctrico nacional. É uma rede com características particulares uma vez que apresenta um perfil de tensões pobre e uma grande extensão.

Na Tabela 6.8 apresentam-se as características gerais dos alimentadores da rede. Devido à dimensão desta rede, 94 nós, optou-se por colocar os seus dados em Anexo. Em Anexo encontram-se detalhados os valores de comprimento, resistência e reactância dos

alimentadores, a topologia da rede, assim como a carga existente em cada nó. Por indicação da EDP, considerou-se em todos os cálculos que o factor de potência é de 0,9 e que a tensão na Subestação é 15KV+5%.

Para fazer a compensação nesta rede, utilizaram-se baterias de condensadores retiradas do catálogo da Merlin Gerin/Schneider Electric 2007. A sua composição, escalões eléctricos e custo encontram-se descritos na Tabela 6.10.

Apresenta-se na Figura 6.7 a caracterização do perfil de tensão da rede sem compensação, e na Tabela 6.9 o valor das perdas sem compensação para três situações de carga: vazio, média e ponta. Pode avaliar-se, através destes dados, a dificuldade em obter soluções admissíveis quando a rede está sujeita à carga máxima, sem que exista um valor de compensação considerável.

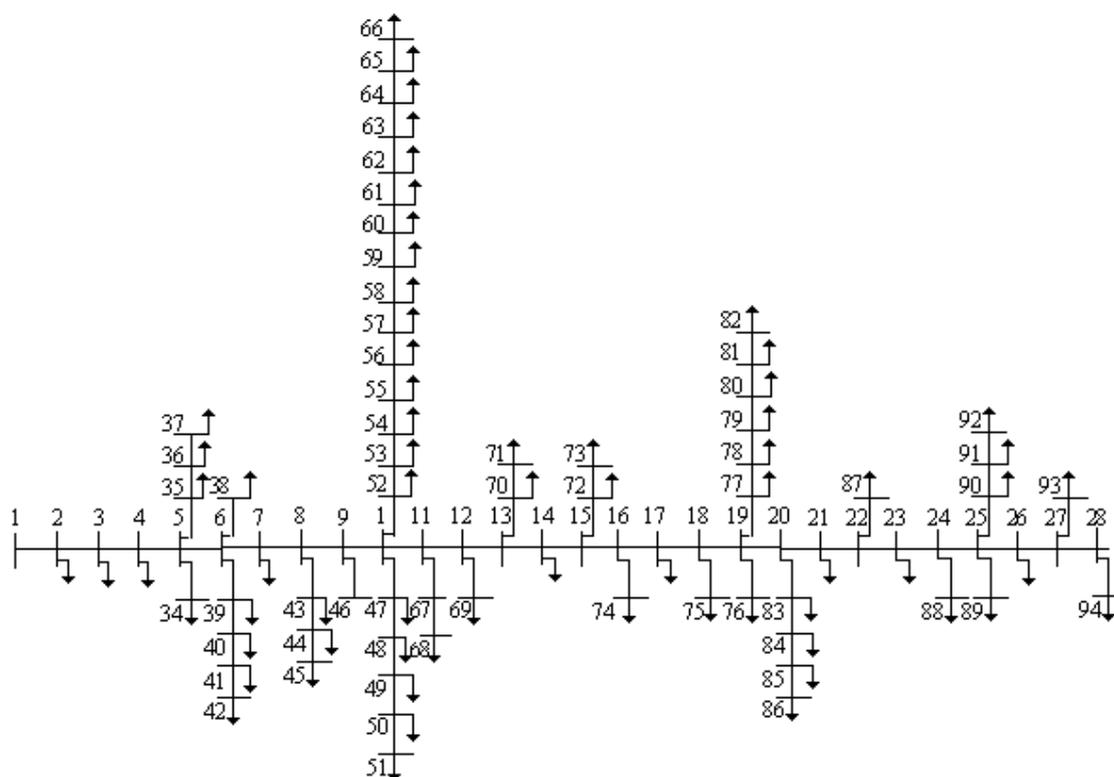


Figura 6.6– Topologia da rede da EDP.

Tabela 6.8 – Características Gerais dos alimentadores da rede.

	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
Comprimento dos alimentadores (m)	256	4027	856	559,6
Resistência (Ω /Km)	0,213	1,5	0,745	0,393
Indutância (Ω /Km)	0,356	0,395	0,379	0,011

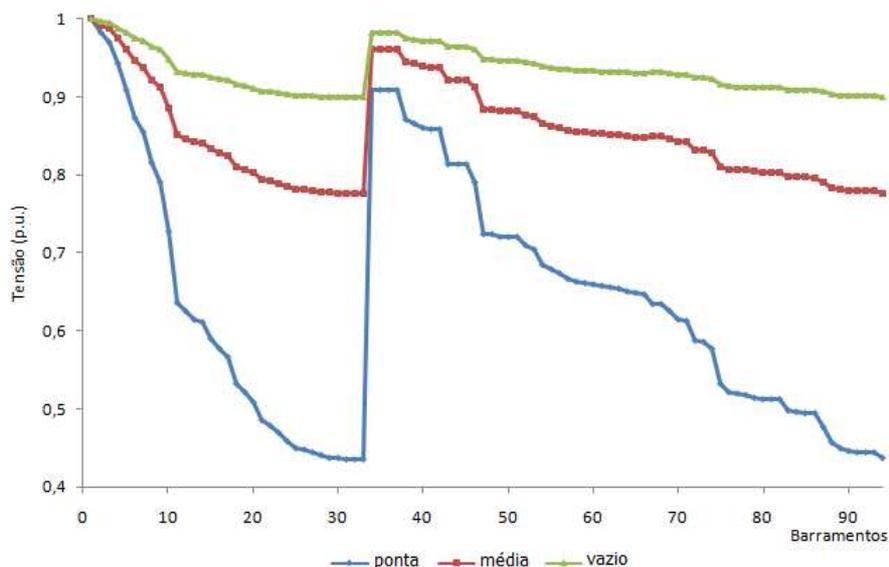


Figura 6.7 – Caracterização dos perfis de tensão da rede da EDP para carga máxima, média e de vazio.

Tabela 6.9 – Perdas na rede da EDP sem compensação, em várias situações de carga.

Situação de Carga	Vazio	Média	Ponta
Perdas sem compensação (kW)	117,9932	340,5818	587,4429

6.3.1 Condensadores

Na selecção das capacidades foram tidos em consideração os valores de consumo de energia reactiva nas redes. De notar que se optou por colocar as baterias de condensadores no lado de baixa tensão, por vários motivos. Por razões económicas: o custo do equipamento a ser instalado para fazer a compensação é muito superior se se colocar a compensação do lado de média tensão. Por razões técnicas: não se encontraram, em nenhuma das marcas de fabricantes de material eléctrico, baterias de capacidade suficientemente baixa para fazer compensação em postos de transformação no lado de média tensão e a instalação de um relé varimétrico, do lado de baixa tensão, suprime a necessidade de telecontrolo, além de permitir controlar as baterias de condensadores por escalões.

Nos preços dos condensadores estão considerados o armário, contactos e relé varimétrico. Na Tabela 6.10 encontram-se descritos os preços e constituição dos condensadores seleccionados.

Tabela 6.10 – Características dos condensadores (preços do catálogo português Merlin Gerin/Schneider Electric 2007)

	Capacidade Máxima (kVAr)	Escalões Eléctricos	Composição	Custo (€)
C1	50	5x10	5+10+20+20	2035
C2	100	5x20	20+40+40	2903
C3	140	7x20	20+40+80	4545
C4	200	5x40	40+80+80	4875
C5	240	8x30	40+80+120	5716
C6	300	5x60	60+120+120	6578
C7	360	9x40	40+80+120+120	7337
C8	400	10x40	40+40+80+120+120	9395

6.3.2 Cenários de Carga

A compensação da energia reactiva na rede de distribuição tem necessariamente de acompanhar a evolução da carga. No caso de isso não se verificar corre-se o risco de aumentarem as perdas devido ao aumento da corrente por circulação de energia reactiva na rede.

Por outro lado, quando se pretende definir a compensação de energia reactiva para uma rede de distribuição, torna-se necessário decidir qual o cenário de carga para o qual as baterias vão ser dimensionadas e colocadas.

Na rede eléctrica disponibilizada pela EDP, os dados de potência tomada fornecida para cada um dos postos de transformação correspondiam à potência de ponta nesse nó. Optou-se por não considerar como cenários de estudo nem a ocorrência simultânea de pontas, nem situações intermédias arbitrariamente caracterizadas por uma fracção da ponta igual em todos os nós de carga. Procurou-se, de outra forma, estabelecer para os diversos nós da rede valores de fracção da ponta diferentes uns dos outros, na proximidade das condições de carga mais severas da rede.

A situação “ideal” seria dispor de diagramas de carga típicos de todos os nós e fazer uma análise repetida ao longo de um dia, com um passo definido no tempo, por exemplo uma hora. Não sendo possível obter o diagrama de carga real para esta rede, devido à referida falta de dados sobre a evolução da carga nos postos de transformação, estabeleceu-se o seguinte processo:

- considerou-se um intervalo temporal, entre as 9 e as 12 horas, durante o qual se supõe que todas as pontas ocorrem;

- considerou-se uma curva aproximativa da zona da ponta de um diagrama de carga, com uma duração superior ao intervalo considerado, como se vê na Figura 6.8.
- considerou-se uma distribuição aleatória dos instantes de ocorrência das pontas (numa determinada hora, em alguns postos de transformação estará a ocorrer a ponta, outros terão apenas uma percentagem da carga máxima);
- com os dados obtidos traçou-se a ponta de um diagrama de carga, entre as 9 e as 12 horas, como se pode observar na Figura 6.9, a partir do qual é possível obter vários cenários de carga da rede.

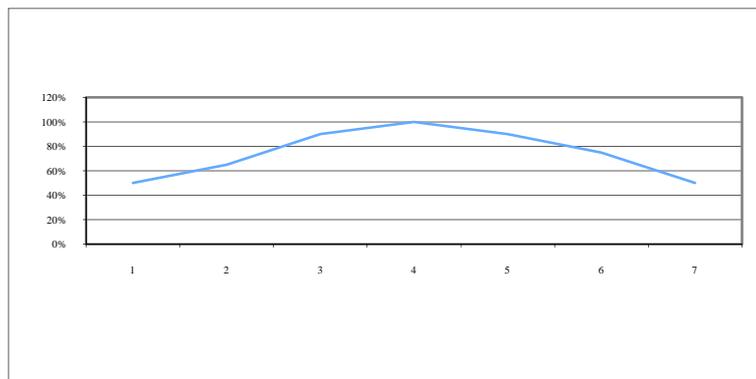


Figura 6.8 – Curva aproximativa da zona da ponta dos diagramas de carga.

Para realizar o ponto 3 considerou-se uma função que distribui aleatoriamente as pontas dos 94 postos de transformação da rede eléctrica da EDP, ao longo do intervalo 9-12 horas. A distribuição de pontas adoptada encontra-se ilustrada na Figura 6.9.

Através deste procedimento obteve-se um conjunto de situações que se aproxima mais das condições de ponta da rede, sem se ter considerado a ocorrência simultânea de pontas em todos os postos de transformação. Esta opção da ocorrência simultânea de pontas, aliás pouco provável, poderia conduzir facilmente as soluções para uma situação de sobrecompensação. Adoptou-se a situação de carga correspondente às 11 horas para fazer a colocação das baterias na rede (Figura 6.10).

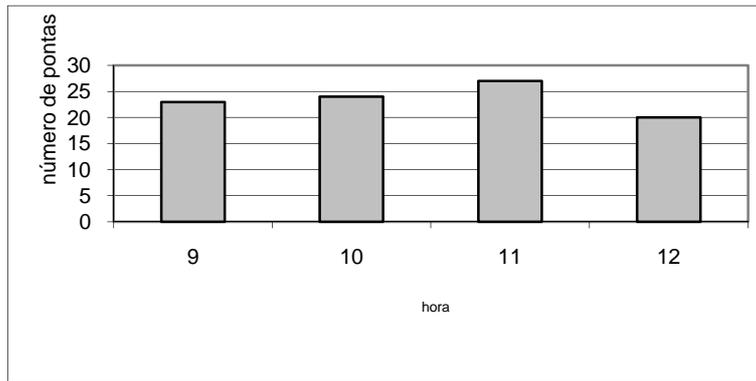


Figura 6.9 – Distribuição das pontas no intervalo 9 – 12 horas.

Como se considera a colocação de condensadores do lado de baixa tensão, o problema de acompanhamento das alterações da carga é tratado através da colocação de relés varimétricos, que permitem a adaptação do valor de compensação através dos escalões das baterias.

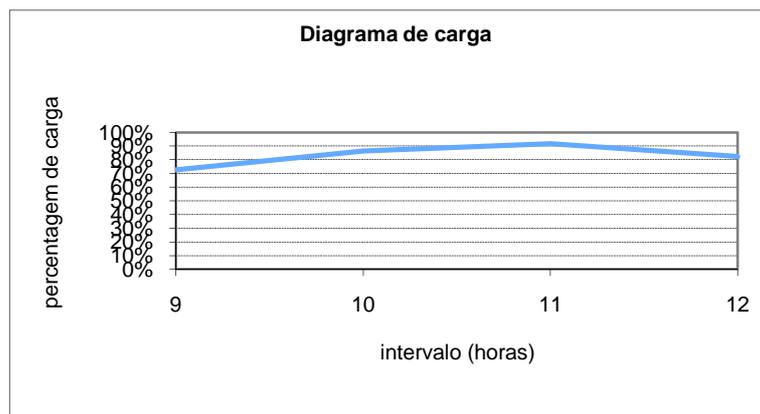


Figura 6.10 – Representação parcial do diagrama de carga, entre as 9 e as 12 horas, considerado para a rede eléctrica da EDP.

6.3.3 Resultados e Comparações Utilizando a Rede da EDP

Depois de ter estabelecido o modelo matemático do problema MO e desenvolvido o programa de cálculo do trânsito de potência, ambos descritos no capítulo 4, foi necessário considerar as abordagens que melhor se adaptariam à resolução de um problema com as características já apresentadas. Seleccionaram-se por isso abordagens que permitem não só trabalhar com um modelo não linear e com um vasto número de soluções possíveis, como também atender ao

facto de existirem dois objectivos em conflito. Apresentam-se de seguida os resultados obtidos com a aplicação dos AEMO já descritos no capítulo 5.

Todos os testes foram feitos considerando as seguintes condições:

- Compensação de 20 barramentos no máximo (cerca de 20% dos barramentos da rede).
- População inicial (sementes) aleatória e idêntica para todos os casos.
- Critério de paragem: número de iterações (500).
- A localização dos condensadores foi obtida considerando que a rede está sujeita a carga máxima (ver secção 6.3.2).

De seguida apresentam-se os resultados conseguidos com cada uma das abordagens seleccionadas. As abordagens são apresentadas por ordem cronológica da criação e aparecimento na literatura científica da área. De referir que ainda se testou outro algoritmo, o VEGA, mas a fronteira obtida com esta abordagem continha poucas soluções e não competia com os resultados das abordagens que lhe sucederam. Os resultados para cada uma das abordagens são sempre apresentados recorrendo a dois gráficos: um gráfico que compara as soluções iniciais e a frente de Pareto final obtida, e outro gráfico que apenas caracteriza esta última frente. Para o caso do NSGA II com pesquisa de vizinhança apresentam-se mais gráficos e caracterizam-se algumas soluções. Apresenta-se também um estudo comparativo entre as diversas abordagens recorrendo a gráficos e tabelas com valores.

Para todos os gráficos é possível fazer a seguinte observação: as soluções de custo muito baixo não são admissíveis, porque não satisfazem a restrição de tensão, e como consequência a solução de custo zero não surge na fronteira de Pareto de nenhuma abordagem.

6.3.3.1 Resultados obtidos com o MOGA

Na Figura 6.11 apresenta-se uma comparação entre o conjunto de soluções iniciais e a frente de Pareto final obtida quando se aplica o MOGA ao problema descrito. Através da Figura 6.12 verifica-se que a frente de Pareto apresenta poucas soluções e não está bem definida ao longo de toda a sua extensão. As soluções destacadas ao longo da fronteira na Figura 6.12 são apresentadas na Tabela 6.11.

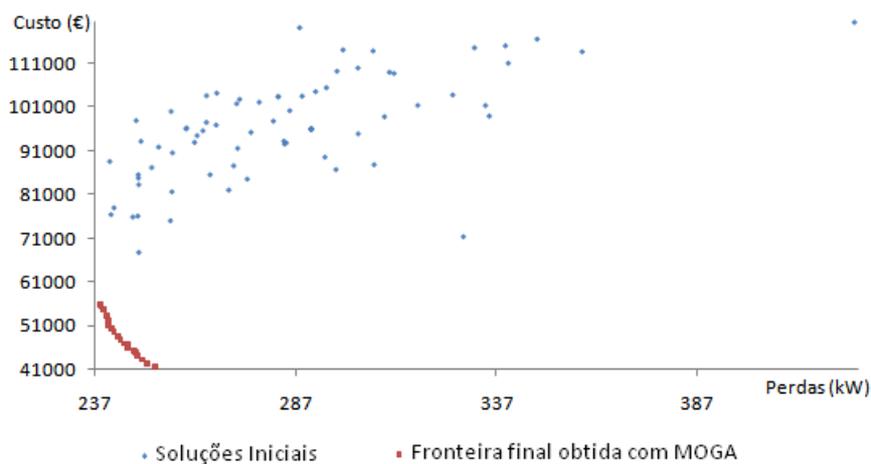


Figura 6.11 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com o MOGA.

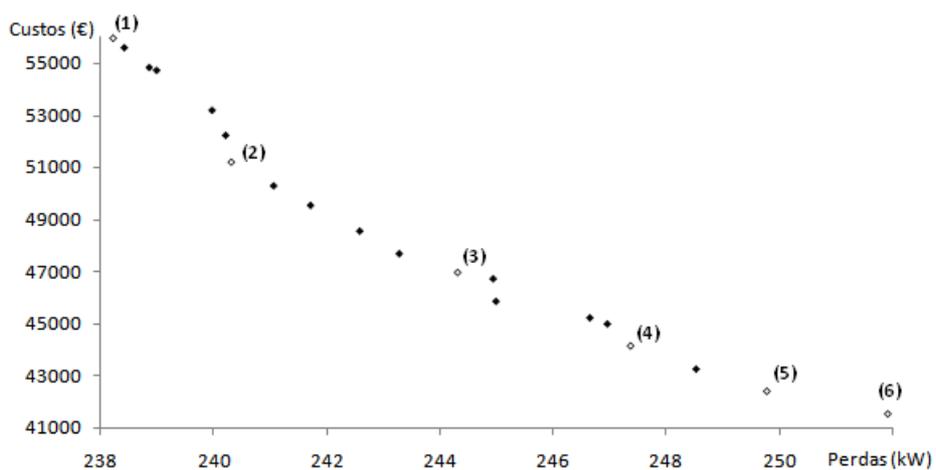


Figura 6.12 – Frente de Pareto obtida com o MOGA.

Tabela 6.11 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.12.

Solução	Perdas (kW)	Custo (€)
1	238,22	55927
2	240,31	51181
3	244,31	46956
4	247,37	44143
5	249,78	42407
6	251,92	41539

6.3.3.2 Resultados obtidos com o SPEA

Os resultados obtidos com o SPEA encontram-se caracterizados na Figura 6.13 e na Figura 6.14. Na Tabela 6.12 encontram-se os valores (perdas e custo) de algumas soluções destacadas ao longo da fronteira. Com este algoritmo a frente de Pareto é bastante regular e bem definida, e domina a frente obtida com MOGA.

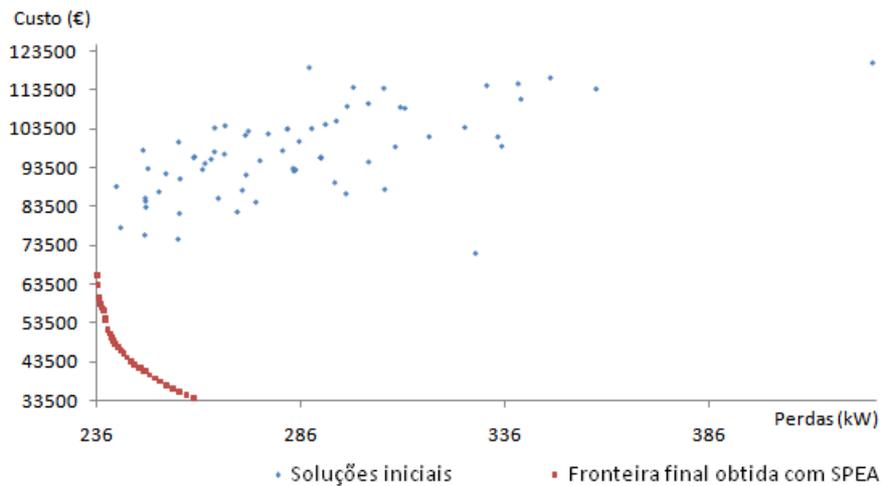


Figura 6.13 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com SPEA.

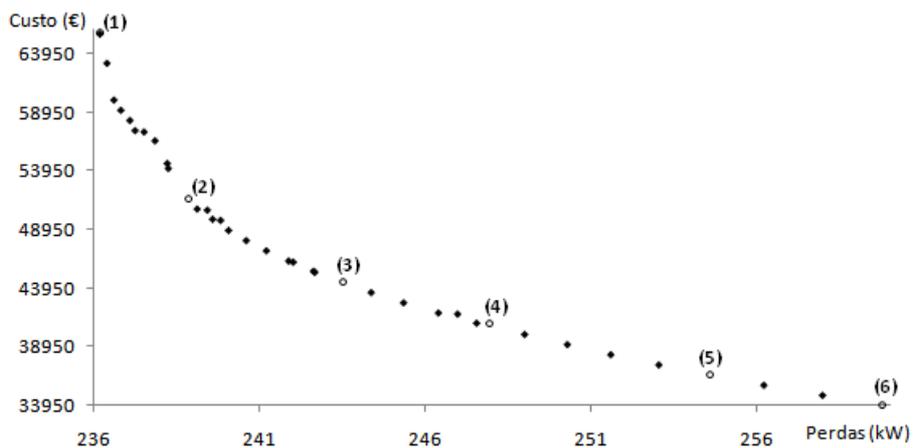


Figura 6.14 – Frente de Pareto obtida com o SPEA.

Tabela 6.12 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.14.

Solução	Perdas (kW)	Custo (€)
1	236,17	65811
2	238,83	51639
3	243,49	44507
4	247,92	40941
5	254,61	36601
6	259,79	33997

6.3.3.3 Resultados obtidos com o NSGA II

Os resultados obtidos com o NSGA II encontram-se caracterizados na Figura 6.15 e na Figura 6.16. Pode observar-se que este algoritmo apresenta um maior número de soluções, principalmente soluções que apresentam menores perdas e maiores custos. A frente de Pareto é bastante extensa e bem definida. Na Tabela 6.13 apresentam-se os valores (perdas e custos) de algumas soluções destacadas ao longo da frente de Pareto.

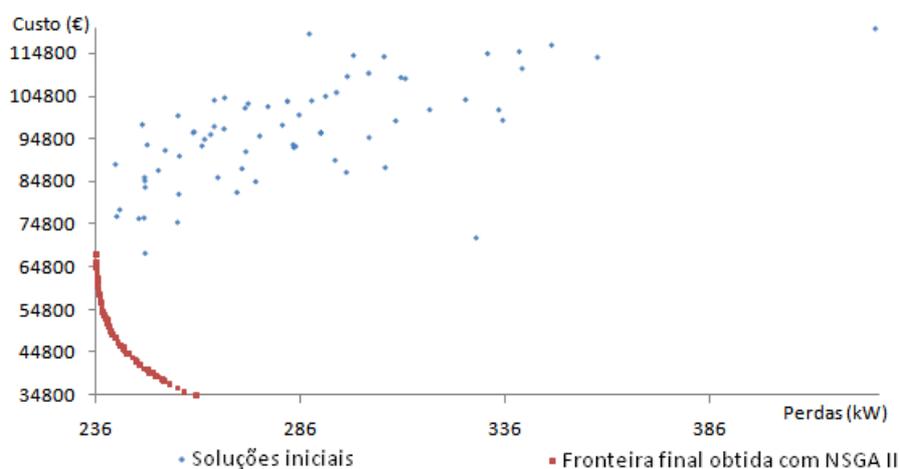


Figura 6.15 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com o NSGA II.

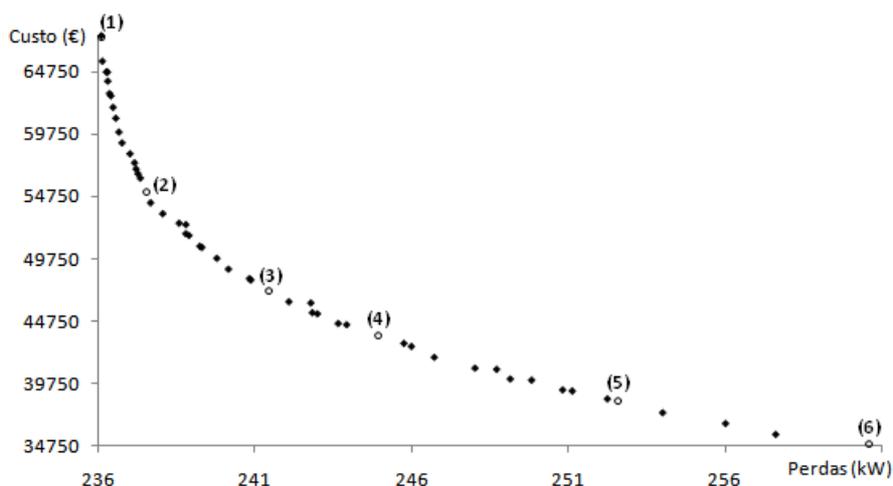


Figura 6.16 – Frente de Pareto obtida com o NSGA II.

Tabela 6.13 – Valores (perdas, custo) das soluções destacadas na Figura 6.16.

Solução	Perdas (kW)	Custo (€)
1	236,08	67530
2	237,5	55111
3	241,43	47205
4	244,93	43639
5	252,59	38337
6	260,59	34865

6.3.3.4 Resultados conseguidos com o NSGA II com pesquisa de vizinhança

Na Figura 6.17 e na Figura 6.18 apresentam-se os resultados obtidos com o algoritmo NSGA II modificado. As soluções não dominadas obtidas por este algoritmo são em número elevado definindo a frente de Pareto de uma forma regular e dominam as obtidas com o algoritmo NSGA II padrão.

Uma análise mais detalhada de algumas soluções desta frente surge na secção “6.3.3.6 Considerações sobre os resultados obtidos com NSGA II com Pesquisa de Vizinhança”, nomeadamente na Figura 6.25 e Tabela 6.17.

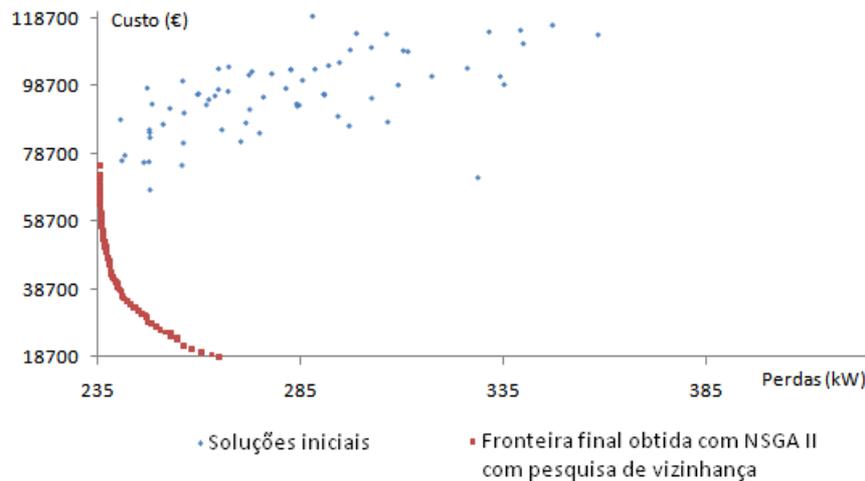


Figura 6.17 – Comparação entre as soluções iniciais e a fronteira final obtida com NSGA II com pesquisa de vizinhança.

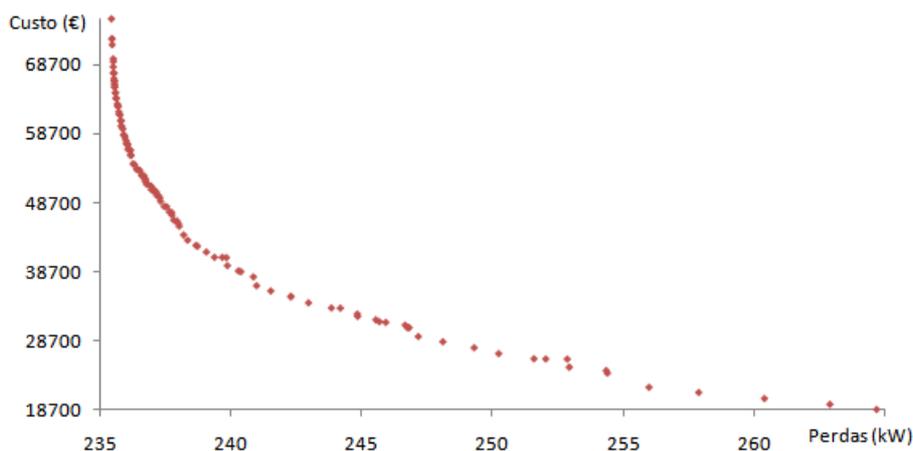


Figura 6.18 – Frente de Pareto obtida com NSGA II com pesquisa de vizinhança.

6.3.3.5 Análise comparativa

A análise comparativa que se apresenta na Figura 6.19 permite-nos verificar que o algoritmo NSGA II com pesquisa de vizinhança obtém um conjunto de soluções não dominadas que dominam as soluções dos outros algoritmos em toda a extensão das suas frentes de Pareto, i.e. as soluções do NSGA II com pesquisa de vizinhança representam um melhor compromisso entre a diminuição das perdas e o investimento em equipamento de compensação. Os gráficos do NSGA II e do SPEA são quase coincidentes, embora o número de soluções e extensão da frente de Pareto do NSGA II seja maior do que a obtida com o SPEA.

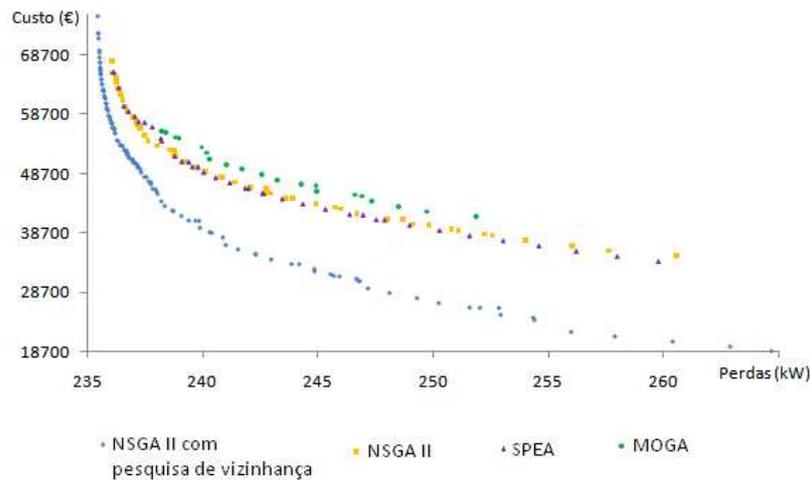


Figura 6.19 – Comparação entre frentes de Pareto obtidas com MOGA, SPEA, NSGA II e NSGA II com pesquisa de vizinhança.

6.3.3.6 Considerações sobre os resultados obtidos com NSGA II com Pesquisa de Vizinhança

Depois de se verificar que a pesquisa de vizinhança descrita no capítulo 5 melhorou os resultados obtidos com o NSGA II, decidiu-se concentrar a atenção neste algoritmo com alterações e a partir dele fazer a análise das soluções obtidas, segundo várias vertentes: análise da convergência do algoritmo para a frente final, análise económica através da poupança em energia ao longo do tempo, melhoria do perfil de tensão conseguida e significado físico das soluções.

I. Análise da Convergência para a Frente de Pareto

Um dos estudos que se realizou foi sobre a convergência do algoritmo. Este é, entre os algoritmos testados, o que mais rapidamente converge para uma frente regular e bem definida, não havendo alterações significativas na fronteira de soluções não dominadas a partir das 100 iterações. Numa corrida de 1000 iterações da aplicação NSGA II com pesquisa de vizinhança, foram-se retirando as soluções não dominadas ao fim de 25, 50, 100, 250, 500, 750 e 1000 iterações. Desta forma foi possível acompanhar quer a rápida convergência do algoritmo, quer a estabilização numa frente de Pareto definida com aumento do número de iterações. Fisicamente também é possível observar que apesar do algoritmo experimentar novos arranjos de locais e dimensão, estes começam a ser repetidos, sinal de que existe convergência para os mesmos locais de compensação. Nesta análise de convergência decidiu-

se limitar o número de barramentos compensados a um valor baixo, 9, para ser mais fácil observar as alterações nas soluções físicas associadas a cada par “custo-perdas”.

Optou-se, para tornar os resultados mais fáceis de comparar, por agrupar as frentes em grupos de três, mantendo uma frente comum para estabelecer a ligação de um gráfico para o outro. Figura 6.20, Figura 6.21 e Figura 6.22. Ainda se apresenta, por último, na Figura 6.23, uma comparação entre a fronteira de soluções não dominadas retirada ao fim de 25 iterações com a finalmente obtida ao fim de 1000 iterações.

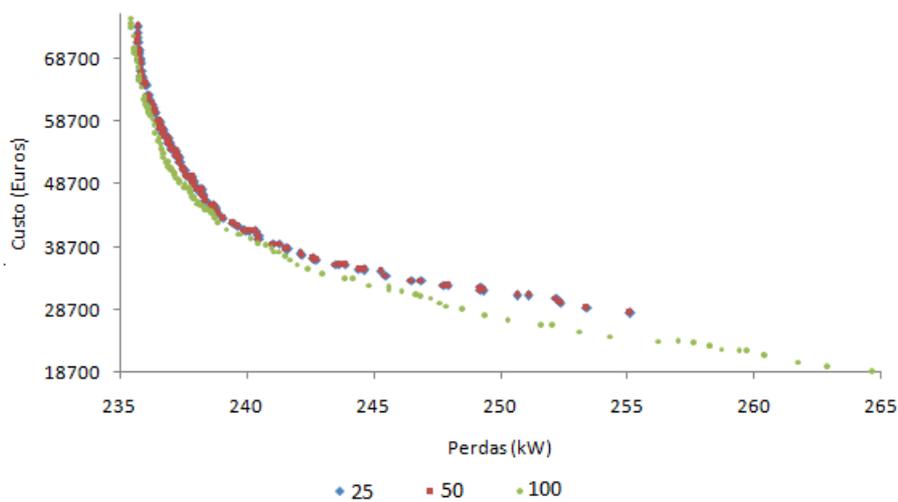


Figura 6.20 – Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 25, 50 e 100 iterações.

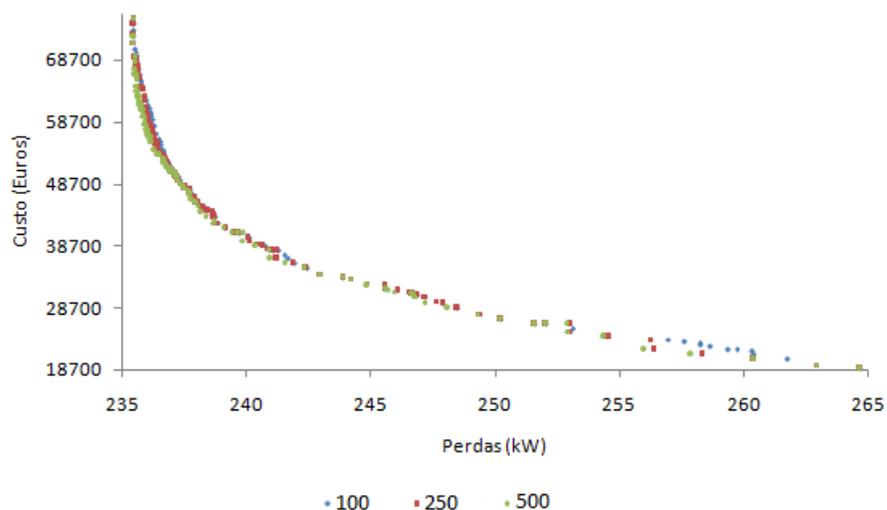


Figura 6.21 - Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 100, 250 e 500 iterações.

Na Figura 6.20 colocaram-se as frentes de Pareto obtidas ao fim de 25, 50 e 100 iterações, na Figura 6.21 colocaram-se as frentes de Pareto obtidas ao fim de 100, 250 e 500 iterações e, por último, na Figura 6.22 as obtidas ao fim de 500, 750 e 1000 iterações. Como se pode observar o algoritmo converge rapidamente para uma frente que quase não sofre alterações a partir das 100 iterações. Verifica-se uma ligeira melhoria relativamente à diminuição de perdas nas soluções que apresentam um custo mais baixo, mas na região de maior custo pode observar-se a coincidência das várias frentes, principalmente na Figura 6.22.

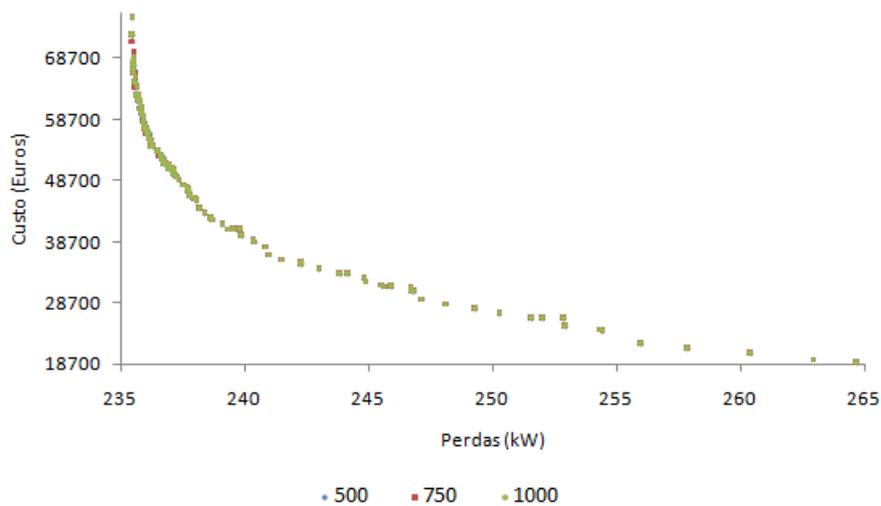


Figura 6.22 - Representação das frentes de Pareto obtidas ao fim de 500, 750 e 1000 iterações.

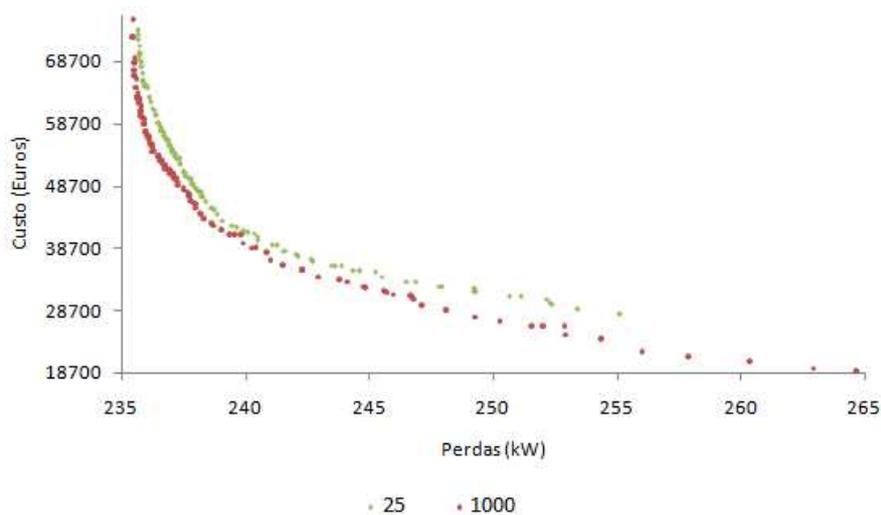


Figura 6.23 – Comparação entre a frente de Pareto obtida ao fim de 20 iterações e no final das 1000 iterações.

Tabela 6.14 – Soluções não dominadas: nós compensados e tipo de condensador colocado, ao fim de 100 iterações.

Condensador									Nó								
3	3	2	2	1	7	2	3	1	7	18	26	47	49	58	70	84	87
2	3	2	2	1	7	2	3	1	7	18	26	47	49	58	70	84	87
2	2	2	2	1	7	1	3	1	14	18	26	47	49	58	69	84	87
2	2	1	1	1	7	1	3	1	12	18	26	28	49	58	70	84	87
2	2	2	1	1	7	1	3	1	14	18	26	47	49	58	69	84	87
1	2	1	1	1	7	1	3	1	15	18	26	28	49	58	70	84	87
1	2	1	1	1	5	1	3	1	15	18	26	28	49	58	70	84	87
1	1	1	1	1	5	1	3	1	18	18	26	28	49	58	70	84	87
1	2	1	1	1	6	1	3	1	15	18	26	28	49	58	70	84	87
2	2	2	3	1	7	1	3	1	14	18	26	46	49	58	69	84	87
1	2	1	1	1	4	1	2	1	17	20	23	28	49	59	70	84	89
1	1	1	1	1	4	1	2	1	17	20	23	28	49	59	70	84	89
4	3	2	2	1	7	2	3	1	7	18	26	47	49	58	70	84	87
1	1	1	1	1	3	1	2	1	17	20	23	28	49	59	70	84	89
1	1	1	1	1	2	1	2	1	17	20	23	28	49	61	70	84	89
5	3	2	2	1	7	2	3	1	7	18	26	47	49	58	70	84	87
6	3	2	2	1	7	2	3	1	7	18	26	47	49	58	70	84	87
1	1	1	1	1	1	1	2	1	17	20	23	28	49	65	70	84	89

Uma vez que se diminuiu o número máximo de barramentos que é possível compensar, pode verificar-se com mais facilidade quais os barramentos que surgem na maioria das soluções. Apresentam-se em seguida os barramentos compensado para a fronteira de 100 iterações e 1000 iterações. Como se pode ver na Tabela 6.14 e na Tabela 6.15, ao fim de poucas iterações existe um conjunto de barramentos sobre os quais recai muitas vezes a escolha da compensação, tais como o 7, o 47, o 58, o 70, o 84 e o 87. Comparando com as soluções iniciais, estes barramentos são encontrados ao fim de algumas iterações e ficam presentes em muitas das soluções finais da Frente de Pareto. São estes os nós em que a colocação de condensadores para compensação do factor de potência melhora mais significativamente o funcionamento da rede do ponto de vista da redução de perdas.

Tabela 6.15 – Soluções não dominadas: nós compensados e tipo de condensador colocado, ao fim de 1000 iterações.

Condensador									Nó								
2	3	2	1	3	7	2	3	1	7	18	26	41	47	58	70	84	87
2	2	2	2	3	7	1	3	1	12	18	26	40	47	58	70	84	87
2	2	2	1	2	7	1	3	1	12	18	26	41	47	58	70	84	87
2	2	1	1	1	7	1	3	1	12	18	26	28	49	58	70	84	87
2	2	2	1	1	7	1	3	1	12	18	26	41	49	58	70	84	87
1	2	1	1	1	7	1	3	1	15	18	26	28	49	58	70	84	87
2	2	1	1	5	1	1	2	1	17	20	23	28	58	65	70	84	89
2	1	1	1	5	1	1	2	1	17	20	23	28	58	65	79	84	89
2	2	1	1	6	1	1	2	1	17	20	23	28	58	65	70	84	89
2	2	2	1	3	7	1	3	1	12	18	26	41	47	58	70	84	87
2	1	1	1	4	1	1	2	1	17	20	23	28	58	65	79	84	89
2	1	1	3	1	1	1	2	1	20	23	28	58	59	65	79	84	89
3	3	2	1	3	7	2	3	1	7	18	26	41	47	58	70	84	87
2	1	1	2	1	1	1	2	1	20	23	28	58	59	65	79	84	89
2	1	1	1	1	1	1	2	1	20	23	28	58	59	65	79	84	89
4	3	2	1	3	7	2	3	1	7	18	26	41	47	58	70	84	87
5	3	2	1	3	7	2	3	1	7	18	26	41	47	58	70	84	87
1	1	1	1	1	1	1	2	1	20	23	28	58	59	65	79	84	89
6	3	2	1	3	7	2	3	1	7	18	26	41	47	58	70	84	87

Através destas tabelas também é possível ver que os barramentos 58 ou 59, quando fazem parte da solução, apresentam sempre uma compensação muito elevada. Neste ramo da rede estes pontos surgem como os mais sensíveis para localizar a compensação. Nesse mesmo ramo, para além dos nós 58 e 59, existem soluções que propõem ainda a compensação do nó 65, sinal da sobrecarga existente e também da sua extensão.

II. Análise da Economia em Energia

Foi efectuado um estudo considerando todas as soluções da fronteira, em que ao investimento inicial é subtraída a economia de energia conseguida com a redução de perdas na rede. Utilizaram-se para custo de energia os preços publicados no Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais (2008) da EDP (Despacho n.º29287/2007, de 21 de Dezembro, da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos); seleccionou-se desse tarifário os preços para os clientes em Média Tensão (MT). O número de horas em vazio, ponta e média também são também os indicados pela EDP, conforme Tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Preço e número de horas/dia em consoante o nível de carga.

Nível de Carga	Vazio+super vazio	Média	Ponta
Preço (€/kWh)	0,05	0,08	0,11
Horas/dia	7	12	5

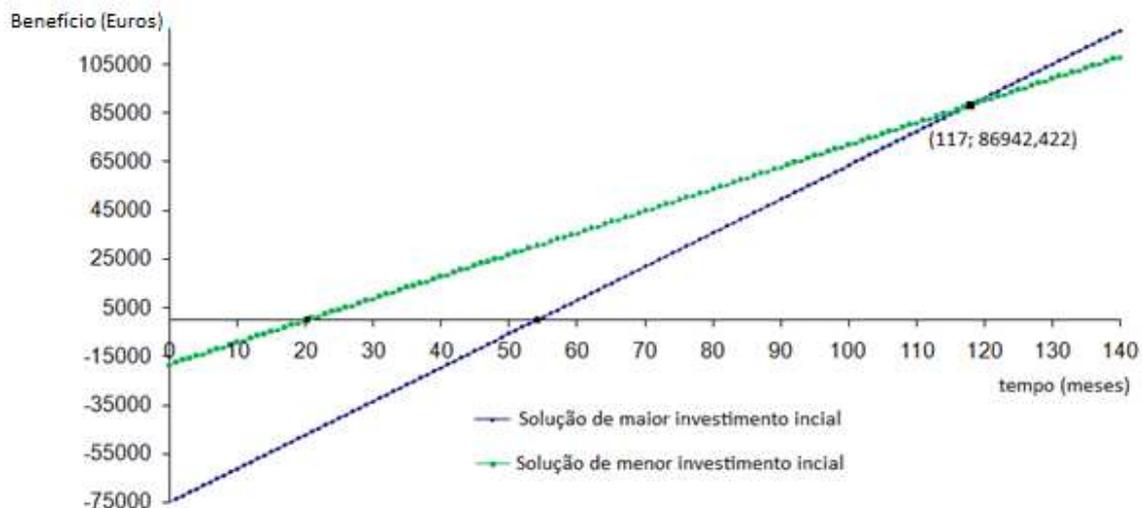


Figura 6.24 – Custo do investimento inicial face à poupança em energia conseguida ao longo dos meses: comparação entre soluções de maior e menor investimento.

Na Figura 6.24 consideram-se as soluções de maior e menor custo presentes na fronteira de Pareto, e é realizada a análise da evolução do respectivo custo ao longo de vários meses após a instalação dos condensadores. O eixo das abcissas representa o tempo, em meses, considerando a origem como o ponto em que se instala a compensação na rede. O eixo das ordenadas representa o benefício que se obtém subtraindo ao valor do investimento inicial o valor da redução de custos por poupança em energia conseguida com a redução das perdas na rede. Pode observar-se na figura que a solução de menor custo obtém o retorno do investimento em cerca de 20 meses e a solução de maior custo que demora cerca de 54 meses. Ao fim de cerca de quase 10 anos (117 meses) a solução de maior custo passa a ser mais vantajosa que a de menor custo inicial. Este estudo é feito de forma simples, mas permite obter uma estimativa do tempo que determinado investimento demora a ter vantagem sobre outro que inicialmente até possa parecer mais atractivo. Para fazer uma avaliação correcta é preciso entrar com outros parâmetros como a possibilidade de adiar o reforço da rede, construção de novas subestações etc., que do ponto de vista de quem faz o planeamento da rede pode pesar mais que esta avaliação simples do tempo que demora em obter o retorno do investimento pela poupança conseguida pela diminuição das perdas.

A Figura 6.26 caracteriza dez soluções ao longo da fronteira de Pareto final obtida, desde a de custo máximo à de custo mínimo e com várias soluções intermédias, ver Tabela 6.17. As soluções destacadas na Fronteira de Pareto são apresentadas na Figura 6.25 (idêntica à apresentada inicialmente na Figura 6.18, mas com a indicação das soluções em estudo).

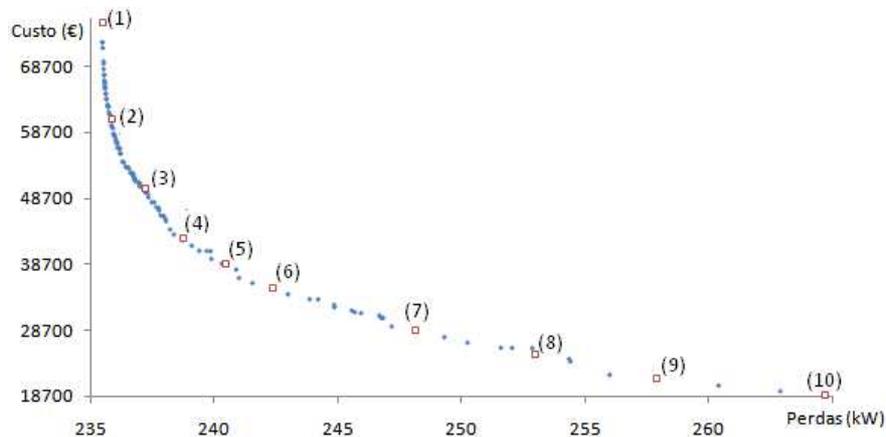


Figura 6.25 – Fronteira de Pareto com as soluções em estudo destacadas.

Tabela 6.17 – Soluções destacadas ao longo da frente de Pareto.

Solução	Perdas (kW)	Custo (€)
1	235,46	75261
2	235,84	60515
3	237,17	50179
4	238,69	42504
5	240,41	38720
6	242,32	35064
7	248,13	28589
8	252,96	24914
9	257,91	21252
10	264,71	18790

Na Figura 6.26 pode verificar-se em cada uma das linhas os tempos de recuperação do investimento inicial para as soluções intermédias, assim como os pontos em que determinadas soluções se tornam mais vantajosas do que outras que apresentam um investimento inicial inferior.

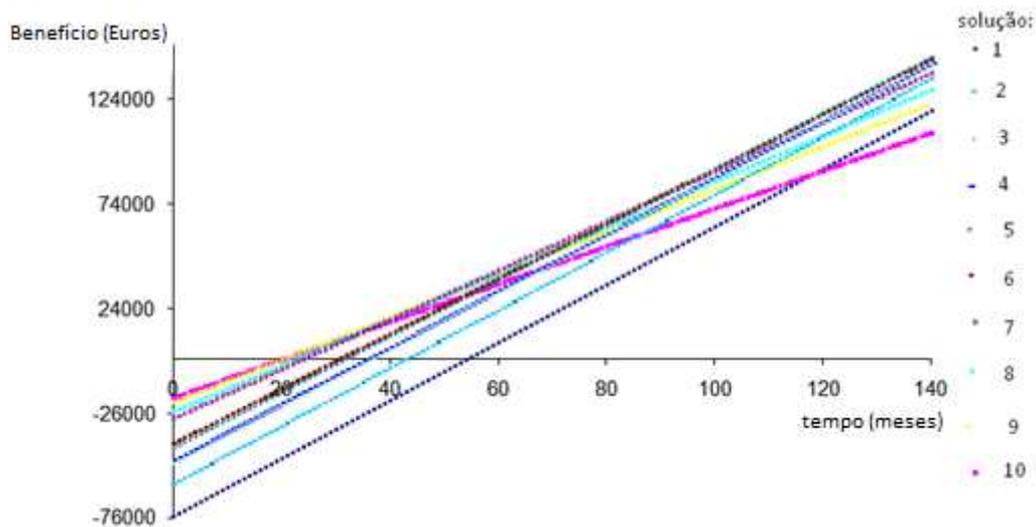


Figura 6.26 – Investimento inicial face à poupança em energia conseguida ao longo dos meses: comparação entre várias soluções da Fronteira de Pareto.

III. Perfil de Tensão

Como já foi referido, uma das exigências de qualidade de serviço feita aos operadores da rede de distribuição é a da manutenção da tensão a que é fornecido o serviço no intervalo de 10% em torno da tensão nominal. Assim, mesmo nas piores condições de carga, em que a queda de tensão ao longo da rede é mais grave, a tensão no último alimentador do troço tem que ser pelo menos igual a 0,9 p.u.. Na rede da EDP, quando não existe compensação a tensão não obedece a este requisito de qualidade e, por esta razão, a solução de custo zero não é admissível. Podem observar-se os perfis de tensão na Tabela 6.18 e na Figura 6.27 para a solução de menores perdas (maior custo), para a de menor custo e também em situação de ausência de compensação. Os perfis de tensão correspondem ao funcionamento da rede com carga máxima. Como se pode verificar, a solução sem compensação tem um perfil de tensão muito pobre o que obriga à existência de compensação para que esta rede esteja a funcionar dentro das restrições de qualidade exigidas. Sem compensação cerca de 76% dos barramentos da rede apresentam tensão abaixo dos 0,9 p.u. exigidos. Quer a solução de custo mínimo, quer a de menores perdas (maior custo) cumprem esta restrição de qualidade de serviço, dado que a abordagem algorítmica só considera soluções admissíveis, estando esta última solução (de maior custo) em maior segurança no caso de ser solicitado um aumento do consumo por parte dos clientes finais.

Tabela 6.18 – Perfil de tensão ao longo da rede da EDP em situação de carga máxima: sem compensação e com as soluções de menor custo e de menores perdas.

Nó	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Sem compens.	1	0,9925	0,9874	0,9754	0,9613	0,9459	0,9386	0,9225	0,9123
Menores perdas	1	0,9978	0,9964	0,9932	0,9895	0,9853	0,9832	0,9788	0,9760
Menor custo	1	0,9963	0,9938	0,9880	0,9812	0,9739	0,9705	0,9631	0,9584
Nó	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Sem compens.	0,8860	0,8508	0,8466	0,8426	0,8412	0,8329	0,8281	0,8243	0,8112
Menores perdas	0,9688	0,9564	0,9549	0,9535	0,9530	0,9499	0,9482	0,9469	0,9424
Menor custo	0,9464	0,9321	0,9304	0,9289	0,9283	0,9252	0,9234	0,9221	0,9174
Nó	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Sem compens.	0,8074	0,8025	0,7943	0,7919	0,7885	0,7850	0,7817	0,7810	0,7798
Menores perdas	0,9409	0,9390	0,9350	0,9338	0,9322	0,9306	0,9290	0,9286	0,9281
Menor custo	0,9161	0,9142	0,9100	0,9088	0,9071	0,9053	0,9038	0,9034	0,9028
Nó	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Sem compens.	0,7782	0,7773	0,7771	0,7767	0,7765	0,7763	0,9607	0,9612	0,9610
Menores perdas	0,9273	0,9269	0,9268	0,9265	0,9264	0,9264	0,9891	0,9895	0,9894
Menor custo	0,9019	0,9014	0,9013	0,9011	0,9009	0,9009	0,9808	0,9811	0,9810
Nó	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Sem compens.	0,961	0,9453	0,9427	0,9391	0,9386	0,9383	0,9217	0,9214	0,9213
Menores perdas	0,9893	0,9851	0,9835	0,9816	0,9813	0,9811	0,9784	0,9783	0,9782
Menor custo	0,9810	0,9735	0,9719	0,9697	0,9693	0,9691	0,9625	0,9624	0,9623
Nó	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Sem compens.	0,9122	0,8847	0,8841	0,883	0,8827	0,8825	0,8775	0,8749	0,8660
Menores perdas	0,9759	0,9684	0,9680	0,9673	0,9672	0,9671	0,9658	0,9648	0,9613
Menor custo	0,9583	0,9456	0,9453	0,9446	0,9445	0,9443	0,9414	0,9399	0,9346
Nó	54	55	56	57	58	59	60	61	62
Sem compens.	0,8633	0,8606	0,8575	0,8559	0,8544	0,8535	0,8527	0,8521	0,8515
Menores perdas	0,9603	0,9593	0,9580	0,9574	0,9567	0,9562	0,9559	0,9556	0,9552
Menor custo	0,9330	0,9314	0,9295	0,9286	0,9277	0,9272	0,9267	0,9264	0,9260
Nó	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Sem compens.	0,8496	0,8487	0,8483	0,8502	0,8500	0,8464	0,8423	0,8421	0,8320
Menores perdas	0,9543	0,9539	0,9536	0,9561	0,9560	0,9548	0,9534	0,9533	0,9494
Menor custo	0,9249	0,9244	0,9241	0,9318	0,9316	0,9304	0,9287	0,9286	0,9246
Nó	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Sem compens.	0,8314	0,8280	0,8111	0,8072	0,8065	0,8061	0,8047	0,8039	0,8037
Menores perdas	0,9491	0,9482	0,9423	0,9408	0,9405	0,9403	0,9397	0,9392	0,9391
Menor custo	0,9243	0,9234	0,9174	0,9160	0,9159	0,9156	0,9148	0,9144	0,9143
Nó	81	82	83	84	85	86	87	88	89
Sem compens.	0,8036	0,7986	0,7976	0,7971	0,7968	0,7912	0,7839	0,7813	0,7802
Menores perdas	0,9391	0,9373	0,9369	0,9366	0,9365	0,9335	0,9303	0,9288	0,9283
Menor custo	0,9142	0,9125	0,912	0,9116	0,9115	0,9084	0,9047	0,9035	0,9029
Nó	90	91	92	93					
Sem compens.	0,7798	0,7797	0,7797	0,7772					
Menores perdas	0,9282	0,9281	0,9280	0,9268					
Menor custo	0,9027	0,9026	0,9027	0,9013					

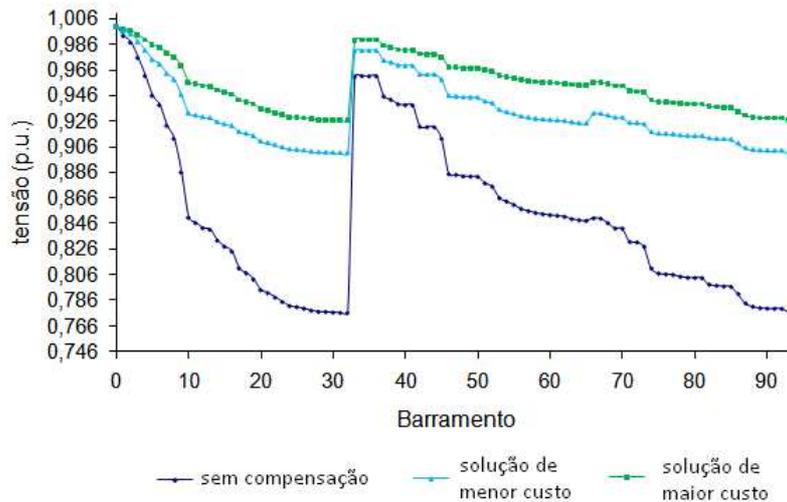


Figura 6.27 – Perfil de tensão para a rede da EDP com carga máxima para três situações: sem compensação, solução de menor custo e solução de menores perdas.

IV. Representação Física das soluções

Cada uma das soluções da fronteira de Pareto está associada a uma configuração física na rede de distribuição, que conduz aos valores das funções objectivo de minimização de perdas e de custo. Neste ponto ilustram-se algumas destas soluções, ver Tabela 6.17, indicando os locais seleccionados para instalar os condensadores e o tipo de condensadores instalados.

Como se pode verificar nas tabelas (Tabela 6.19 a Tabela 6.28) existem locais na rede que surgem na maioria das soluções tais como os barramentos 83 ou 84, 70, 58 ou 59, 56, 47, 26, 15 e 7. Estes serão os pontos na rede mais sensíveis à colocação de compensação, uma vez que surgem quer nas soluções de menor custo, quer nas de menores perdas (maior custo).

Tabela 6.19 – Caracterização da Solução 1: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 1																			
Localização	14	18	28	35	38	40	43	47	52	56	58	59	65	67	70	79	84	88	91
Condensador	3	4	2	5	4	3	2	4	4	4	4	4	1	1	1	2	6	2	1

Tabela 6.20 – Caracterização da Solução 2: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 2												
Localização	7	12	26	41	49	52	58	59	65	77	84	87
Condensador	7	5	4	2	2	7	7	4	1	5	6	2

Tabela 6.21 – Caracterização da Solução 3: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 3								
Localização	8	26	47	56	59	70	77	84
Condensador	7	4	5	7	7	2	7	7

Tabela 6.22 – Caracterização da Solução 4: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 4						
Localização	15	26	47	56	59	84
Condensador	7	6	6	7	7	7

Tabela 6.23 – Caracterização da Solução 5: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 5						
Localização	15	24	50	56	59	84
Condensador	7	7	1	7	7	7

Tabela 6.24 – Caracterização da Solução 6: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 6					
Localização	17	26	56	59	84
Condensador	7	5	7	7	7

Tabela 6.25 – Caracterização da Solução 7: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 7				
Localização	15	26	59	83
Condensador	7	6	7	7

Tabela 6.26 – Caracterização da Solução 8: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 8				
Localização	17	24	59	83
Condensador	2	7	7	7

Tabela 6.27 – Caracterização da Solução 9: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 9			
Localização	26	59	83
Condensador	6	7	7

Tabela 6.28 – Caracterização da Solução 10: locais seleccionados e tipo de baterias instaladas.

Solução 10			
Localização	26	77	83
Condensador	4	6	7

Nas Figura 6.28, Figura 6.29 e Figura 6.30 ilustra-se a rede da EDP destacando os locais de compensação para três de soluções: a solução de menores perdas (maior custo), uma solução de custo intermédio e a solução de menor custo.

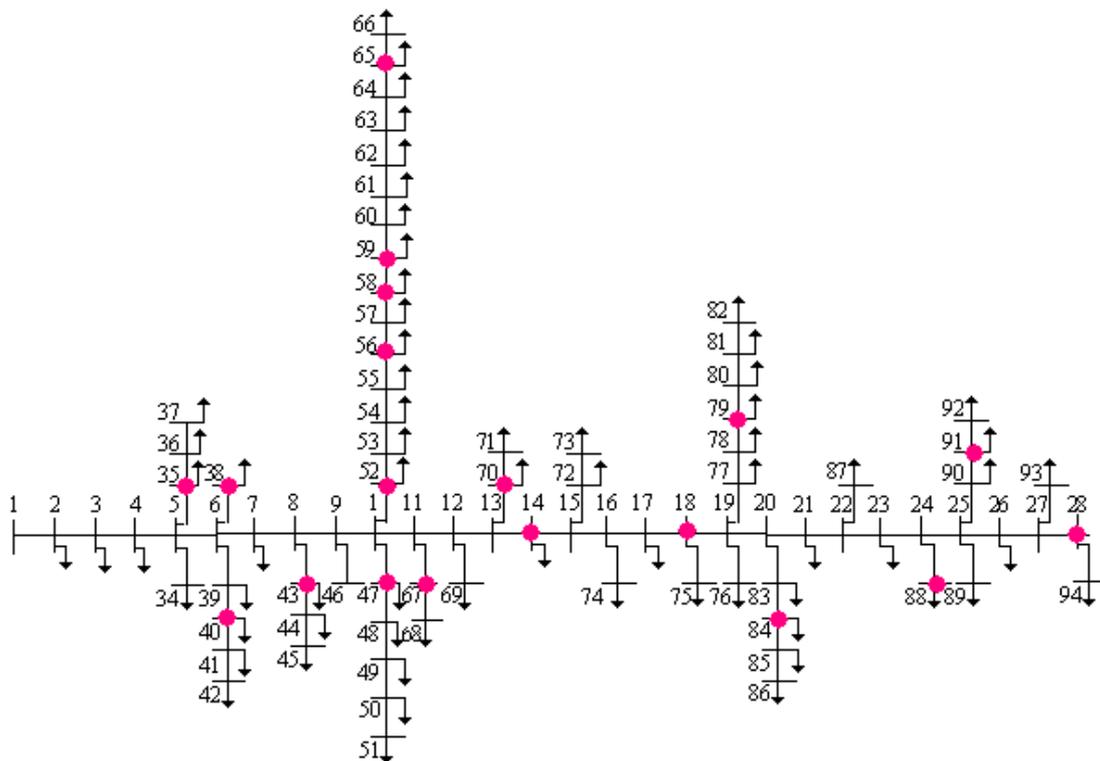


Figura 6.28 – Rede com a localização dos condensadores para a solução de menores perdas (solução 1).

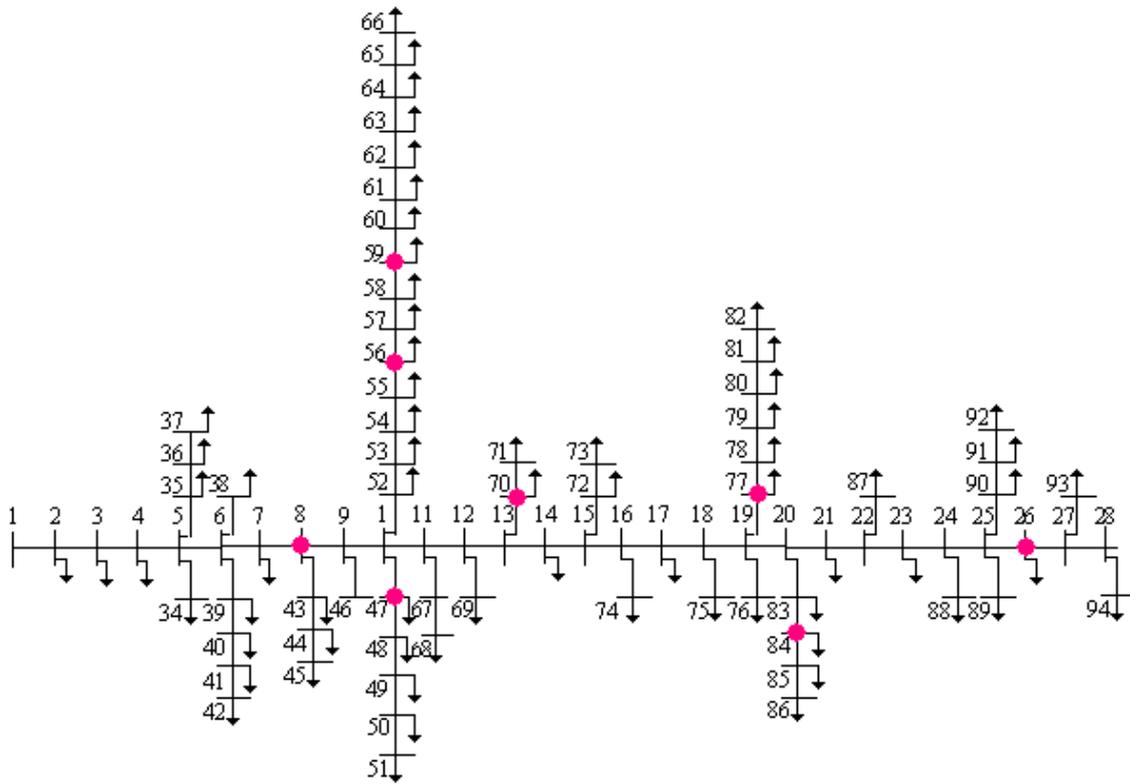


Figura 6.29 – Rede com a localização dos condensadores para uma solução intermédia (solução 3).

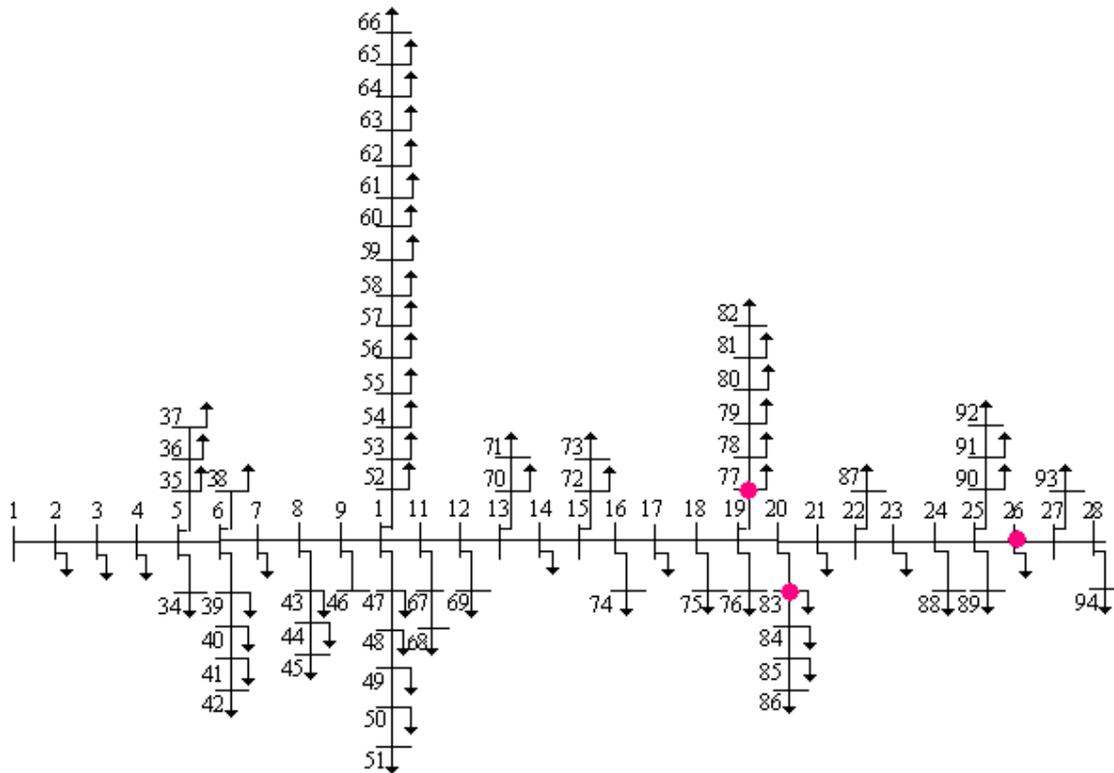


Figura 6.30 – Rede com a localização dos condensadores para a solução de menor custo (solução 10).

6.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentou-se um estudo comparativo entre três abordagens utilizando uma rede retirada da bibliografia e utilizada como rede de teste por vários investigadores da área.

Foi feito um estudo utilizando os mesmos dados que se encontravam num artigo que serviu de base de comparação. Verificou-se que o algoritmo NSGA II modificado obtém melhores soluções, quando comparado quer com o NSGA II, quer com a abordagem proposta no artigo.

Apresentou-se também a aplicação de vários AEMO padrão, bem como de um algoritmo ao qual foram introduzidas alterações adaptadas para este problema, ao problema da compensação de energia reactiva. O estudo foi feito sobre uma rede da EDP Distribuição. Apresentaram-se e analisaram-se os resultados e verifica-se que a pesquisa de vizinhança feita dentro do algoritmo NSGA II permite obter melhores soluções para este problema. Esta pesquisa de vizinhança permite um refinamento das soluções encontradas, levando o algoritmo NSGA II modificado a superar a frente de Pareto encontrada por qualquer um dos outros AEMO.

Utilizou-se este algoritmo modificado com uma fase de pesquisa local para efectuar várias análises aos resultados obtidos: caracterizou-se a rede do ponto de vista dos nós mais indicados para colocar condensadores, apresentaram-se melhorias introduzidas no perfil de

tensão com a existência de uma compensação adequada e também se apresentou um estudo que caracteriza as vantagens em economia de energia conseguida com a diminuição das perdas na rede.

7

CONCLUSÕES FINAIS E PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES FINAIS

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento de uma metodologia que permite apoiar o planeamento da compensação energia reactiva em redes de distribuição de energia eléctrica radiais.

No sentido de dotar os decisores com informação adequada para esta tarefa de planeamento, foi considerado um modelo MO que melhor traduz os compromissos técnico-económicos em causa neste problema.

Foi também desenvolvido um algoritmo de cálculo do trânsito de potência que optimizou quer a precisão dos resultados, quer o tempo de cálculo necessários para caracterizar a rede sujeita a diferentes perfis de carga.

Foram implementados vários AEMO que permitiram realizar e apresentar um estudo comparativo sobre a sua aplicação a este problema.

Considerando o AEMO que obteve melhores resultados, foram concebidas e implementadas várias alterações, no sentido de o adaptar às características particulares do problema e ao modelo MO desenvolvido. Através de uma técnica de pesquisa local introduzida no NSGA II foram obtidos resultados consideravelmente melhores do que os alcançados pelo algoritmo standard.

Foi feito um estudo comparativo com uma rede retirada da bibliografia, muitas vezes usada como rede de teste, e demonstrada a superioridade do NSGA II com pesquisa local face ao NSGA II e a outras abordagens algorítmicas.

Com os resultados obtidos com a aplicação do NSGA II com pesquisa de vizinhança à rede real de teste, foi possível caracterizá-la do ponto de vista dos nós mais indicados para colocar compensação, fornecer uma ferramenta de apoio à tomada de decisões neste problema

considerando objectivos técnicos e económicos salvaguardando restrições de qualidade de serviço prestada, bem como apresentar um estudo que caracteriza as vantagens em economia de energia conseguida com a diminuição das perdas na rede.

7.2 ORIENTAÇÕES PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Nesta dissertação foi apresentado um modelo multi-objectivo para apoio à decisão no problema da compensação de energia reactiva em redes de distribuição de energia eléctrica. Um dos pontos que se pretende explorar no seguimento deste trabalho consiste na introdução de alterações no modelo, face a redes de distribuição com problemas específicos ou em que haja conhecimento de outro tipo de componentes existentes. Um dos desenvolvimentos possíveis, caso existam dados que permitam alimentar o modelo, é a consideração de pequenos produtores de energia eléctrica ligados à rede de distribuição e a integração de transformadores com tomadas de regulação em carga e/ou outros equipamentos na rede de distribuição.

Pretende-se também desenvolver a abordagem algorítmica proposta de forma a incorporar as preferências do decisor ao longo do processo de pesquisa de soluções. O objectivo é o de reduzir o esforço computacional, evitando o cálculo de soluções não interessantes, reduzindo o âmbito da pesquisa através do uso de informação fornecida pelo decisor, face a soluções que lhe são apresentadas durante o processo, para orientar a pesquisa para as regiões do espaço de pesquisa onde se localizam as soluções que melhor correspondem à sua estrutura de preferências. Esta estrutura de preferências podem também ser considerada evolutiva, dado um processo interactivo deste tipo providenciar a aprendizagem do próprio problema, isto é, é minimizando não apenas o esforço computacional de cálculo de soluções mas também o esforço cognitivo de análise de soluções.

Por último, outra linha de desenvolvimento já iniciada em Barrico et al. (2009), prende-se com a análise de robustez das soluções, nomeadamente a utilização do conceito de grau de robustez proposto em Barrico e Antunes (2007). Pretende-se avaliar se as soluções encontradas são robustas, em termos da degradação do valor das funções objectivo, em situações de variação súbita da carga nalgum alimentador ou interrupção de serviço em algum ponto da linha, desta forma providenciando informação adicional ao decisor para a identificação de soluções mais “imunes” a variações em diversos parâmetros do modelo.

REFERÊNCIAS

Abido e Bakhashwain (2003)

M.A. Abido, J. M. Bakhashwain, "A novel multiobjective evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch problem", Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 3, 1054-1057, Dezembro 2003.

Abido e Bakhashwain (2005)

M.A. Abido, J. M. Bakhashwain, "Optimal VAR dispatch using a multiobjective evolutionary algorithm", Electrical Power and Energy Systems, 27, 13-20, 2005.

Abido (2006a)

M.A. Abido, "Multiobjective Evolutionary Algorithms for Electric Power Dispatch Problem" IEEE Transactions on Evolutionary Computations, 10(3), 315-329, Junho 2006.

Abido (2006b)

M.A. Abido, "Multiobjective Optimal VAR Dispatch Using Strength Pareto Evolutionary Algorithm", IEEE Congress on Evolutionary Computation, Julho 2006.

AIEE Committee Report (1953)

AIEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1950-1952", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and System - Part III, PAS-72(2), 1336-1339, Janeiro 1953.

AIEE Committee Report (1956)

AIEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1952-1954", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and System - Part III, PAS-75(3), 26-28, Janeiro 1956.

AIEE Committee Report (1958)

AIEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1954-1956", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and System - Part III, PAS-77(3), 666-669, Abril 1958.

Antunes et al. (2005)

C.H. Antunes, C. Barrico, A. Gomes, D. F. Pires, A.G. Martins, "On the Use of Evolutionary Algorithms for Reactive Power Compensation in Electrical Distribution Networks – Experiments on a Case Study", (MIC 2005), August 22-26, 2005, Vienna, Austria.

Antunes et al. (2009)

C.H. Antunes, C. Barrico, A. Gomes, D. F. Pires, A. G. Martins, "A Multi-objective Evolutionary Algorithm for Reactive Power Compensation in Distribution Networks", *Applied Energy* 86 (7-8), 977-984, July-August 2009,.

Aoki et al. (1988)

K. Aoki, M.Fan, A. Nishikori, "Optimal VAR planning by approximation method for recursive mixed-integer linear programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(4), 1741-1747, Novembro 1988.

Augugliaro et al. (2006)

A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuzza, M.G. Ippolito, E.R. Sanseverino, "Constrained Robust Multiobjective Optimization for Reactive Design in Distribution Systems", *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 1-6, Junho 2006.

Bae (1978)

Y.G. Bae, "Analytical Method of Capacitor Allocation on Distribution Primary Feeders", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97(4), 1232-1238, Julho 1978.

Balakumaran e Thanuskodi (2004)

J. Balakumaran, K. Thanuskodi, "Loss reduction in radial distribution systems by capacitor placement: fuzzy technique", *E-Tech* 2004, 23-29, Julho 2004.

Bäck et al. (1991)

T. Bäck, F. Hoffmeister e H.-P. Schwefel, "A survey of evolution strategies", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. R. K. e L. B. Booker (Eds). Morgan Kaufmena Publishers, 2-9, 1991.

Bäck (1996)

T. Bäck, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*. Oxford University Press, 1996.

Baker (1985)

J.E. Baker, *Adaptive selection methods for genetic algorithms*. *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, J.J. Gredenstett (Ed.), Lawrence Erlbaum Associates, 1985.

Baran e Wu (1989a)

M.E. Baran, F.F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4, 725-734, Janeiro 1989.

Baran e Wu (1989b)

M.E. Baran, F.F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system". IEEE Transactions on Power Delivery, 4, 735-743, Janeiro 1989.

Baran et al. (2001)

B. Barán, J. Vallejos, R. Ramos, U. Fernández, "Reactive power compensation using a multi-objective evolutionary algorithm", IEEE Porto Power Tech Conference, Setembro 2001.

Barrico (2007)

C. Barrico, "Optimização Evolucionária Multi-Objectivo em ambientes Incertos – Pesquisa de Soluções Robustas". Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotecnica e de Computadores, Especialidade de Informática. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.

Barrico e Antunes (2007)

C. Barrico, C. Henggeler Antunes, "An Evolutionary Approach for Assessing the Degree of Robustness of Solutions to Multi-Objective Models", In: Y. S. Ong, J. Yaochu, Y. Shengxiang (Eds.), "Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments", Series on Studies in Computational Intelligence, vol. 51, 565-582, Springer, 2007.

Barrico et al. (2009)

C. Barrico, C. Henggeler Antunes and D. F. Pires, "Robustness Analysis in Evolutionary Multi-Objective Optimization Applied to VAR Planning in Electrical Distribution Networks". Carlos Cotta and Peter Cowling (Eds.): Proceedings of the 9th European Conference Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EvoCOP 2009), Tübingen, Germany, April 15-17, 2009. Lecture Notes in Computer Science 5482, pp. 216–227. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

Begovic et al. (2004)

M.M. Begovic, B. Radibratovic, F.C. Lambert, "On multiobjective volt-VAR optimization in power systems", Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Janeiro 2004.

Bortignon (1995)

G.A. Bortignon, M.E. El-Hawary, "A review of capacitor placement techniques for loss reduction in primary feeders on distribution systems". Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2, 684-687, Setembro 1995.

Bridenbaugh e tal. (1992)

C.J. Bridenbaugh, D.A. DiMascio, R. D'Aquila, "Analytical Method of Capacitor Allocation on Distribution Primary Feeders", IEEE Transactions on Power Systems, PAS-7(1), 222-227, Fevereiro 1992.

Bunch (1982)

J.B. Bunch, R.D. Miller, J.E. Wheeler, "Distribution System Integrated Voltage and Reactive Power Control", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(2), 284-289, Fevereiro 1982.

Carlisle (1997)

J.C. Carlisle, A.A. El-Keib, D. Boyd, K. Nolan, "A review of capacitor placement techniques on distribution feeders", Proceedings of the Twenty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory, 359-365, March 1997.

Chang (1967)

N.E. Chang, "Optimum allocation of shunt capacitors and voltage regulators on primary feeders", IEEE Winter Power Meeting, New York, 1967.

Chang (1968)

N.E. Chang, "Determination of primary-feeder losses", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-87(12), 1991-1994, Dezembro 1968.

Chang (1969)

N.E. Chang, "Locating Shunt Capacitors on Primary Feeder for Voltage Control and Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88(10), 1574-1577, Outubro 1969.

Chang (1972)

N.E. Chang, "Generalized equations on loss reduction with shunt capacitor", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-91(5), 2189-2195, Setembro 1972.

Chen et al. (1991)

T.-H. Chen, M.-S. Chen, K.-J. Hwang, P. Koats, E.A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, 6(3), 1146-1152, 1991

Chen e Liu (1994)

Y.-L. Chen, C.-C. Liu, "Multiobjective VAR planning using the goal-attainment method", IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 141 (3), 227-232, 1994.

Chen et al. (1995)

C.S. Chen, C.T. Hsu, J.C. Yan, "Optimal distribution feeder capacitor placement considering mutual coupling effect of conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, 10(2), 987-994, Abril 1995.

Chen e Liu (1995)

Y.-L. Chen; C.-C. Liu, "Optimal multi-objective VAR planning using an interactive satisfying method", IEEE Transactions on Power Systems, 10(2), 664-670, Maio 1995.

Chen (1998)

Y.-L. Chen, Weighted-norm approach for multiobjective VAR planning, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 145 (4), 369-374, 1998.

Chiang et al. (1990a)

H.-D. Chiang, J.-C. Wang, O. Cockings, H.-D. Shin, "Optimal capacitor placements in distribution systems. I. A new formulation and the overall problem " IEEE Transactions on Power Delivery, 5(2), 634-642, April 1990.

Chiang et al. (1990b)

H.-D. Chiang, J.-C. Wang, O. Cockings, H.-D. Shin, "Optimal capacitor placements in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results" IEEE Transactions on Power Delivery, 5(2), 643-649, April 1990.

Chin e Lin (1994)

H.C. Chin, and W.M. Lin, "Capacitor Placements for Distribution Systems with Fuzzy Algorithm", Proceedings of TENCON'94 IEEE Region 10's Ninth Annual International Conference, 2, 1025-1029, 1994.

Chiou et al. (2004)

Ji-Pyng Chiou, Chung-Fu Chang e Ching-Tzong Su, "Ant direction Hybrid differential evolution for solving large capacitor placement problems". IEEE Transactions on Power Systems, 19 (4), Novembro 2004.

Civanlar e Grainger (1985a)

S. Civanlar e J. J. Grainger, "Volt/Var Control on distribution Systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators Part II: The Solution Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104(11), 3284-3290, Novembro 1985.

Civanlar e Grainger (1985b)

S. Civanlar e J. J. Grainger, "Volt/Var Control on distribution Systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators Part III: The numerical results". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104(11), 3285-3297, Novembro 1985.

Clímaco et al. (2003)

J.N. Clímaco, C.H. Antunes e M.J. Alves, *Programação linear multiobjectivo. Do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de varias funções objectivo*. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.

Cook (1959)

R.F. Cook, "Analysis of capacitor application by load cycle", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems-Part III, PAS-78, 950-957, Outubro 1959.

Cook (1961)

R.F. Cook, "Optimizing the application of shunt capacitors for reactive-volt-ampere control and loss reduction", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems -Part III, PAS-80, 430-444, Agosto 1961.

Cova et al. (1995)

B. Cova, N. Losignore, P. Marannino, M. Montagna, "Contingency constrained optimal reactive power flow procedures for voltage control in planning and operation", IEEE Transactions on Power Systems, 10(2), 602-608, May 1995.

Coello (2000)

C.A.C. Coello, "A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques". Knowledge and Information Systems 1(3), 129-156, 2000.

Cuello-Reyna e Cedeno-Maldonado (2006)

A. A. Cuello-Reyna, J.R. Cedeno-Maldonado, "A Differential Evolution Approach to Optimal Reactive Power Planning", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC '06, 1-7, Agosto 2006.

Das et al. (1994)

D. Das, H. S. Nagi, D.P. Kothari, "Novel Method for Solving Radial Distribution Networks", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 141(4), 291-298, 1994.

Das (2008)

D. Das, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method". Electrical Power and Energy Systems, 30, 361-367, 2008.

Dash et al. (1991)

P.K. Dash, S. Saha, P.K. Nanda, "Artificial neural net approach for capacitor placement in power system", Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, 247-250, 1991.

Deb (1999)

Kalyanmoy Deb, *Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering Design*, Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science, chapter 8, pages 135-161, Kaisa Miettinen, Marko M. Mäkelä, Pekka Neittaanmäki, and Jacques Periaux, editors. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 1999.

Deb et al. (2000)

K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, e T. Meyarivan, "A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA- II", Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature VI, Springer, 849- 858, 2000.

Deb (2001)

K. Deb, *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Wiley, Chichester, 2001.

Deeb e Shahidehpour (1993)

N.I. Deeb, S.M. Shahidehpour, "Cross decomposition for multi-area optimal reactive power planning", IEEE Transactions on Power Systems, 8(4), 1539-1544, Novembro 1993.

Dehkordi (2006)

B.M. Dehkordi, "Optimal Voltage and Reactive Power Control Based on Multi-Objective Genetic Algorithm", International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06, 1-5, Dezembro de 2006.

Dorigo et al. (1996)

M. Dorigo, V. Maniezzo e A. Coloni, "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B, 26 (1), 29-31, 1996.

Duran (1968)

H. Duran, "Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders A Dynamic Programming Approach", Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-87(9), 1769-1774, Setembro 1968.

Eiben e Smith, (2003)

A.E. Eiben e J.E Smith, *Introduction to evolutionary computing*. Natural and Computing Series, Springer, 2003.

Erickson et al. (2001)

M. Erickson, A. Mayer, J. Horn, "The Niche Pareto Genetic Algorithm 2, applied to the design of groundwater remediation system", EMO 2001, Zurich, Switzerland, 7-9, Março 2001.

Ertem (1983)

S. Ertem, "Optimal shunt capacitor sizing for reduced line loading, voltage improvement and loss reduction of distribution feeders", Proceedings of the Twenty-First Annual North-American Power Symposium, 262-269, Outubro 1989.

Expósito e Ramos (1999)

Expósito, A.G., E. R. Ramos, "Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 1063-1069, 1999.

Favuzza et al. (2006)

S. Favuzza, M.G. Ippolito, E. R. Sanseverino, "Crowded comparison operators for constraints handling in NSGA-II for optimal design of the compensation system in electrical distribution networks", *Advanced Engineering Informatics*, 20(2), 201-211, Abril 2006.

Feo e Resende (1989)

T.A. Feo e M.G.C. Resende, "A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem", *Operations Research Letters*, 8:67-71, 1989.

Fernandes et al. (1993)

R.A. Fernandes, F. Lange, R.C. Burchett, H.H. Happ, K.A. Wirgau, "Large Scale Reactive Power Planning", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102(5), 1083-1088, Maio 1983.

Fleurent e Ferland (1993)

C. Fleurent e J.A. Ferland (1993), "Genetics hybrids for the quadratic assignment problem". *Quadratic Assignment and Related Problems 16*, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, P.M. Pardalos e H. Wolkowicz (Eds). American Mathematical Society, 173-188, 1993.

Fonseca e Fleming (1993)

C.M. Fonseca e P.J. Fleming, "Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization". Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 316-323, 1993.

Fonseca e Fleming (1995)

C.M. Fonseca e P.J. Fleming, "An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization". *Evolutionary Computation* 3(1), 1-16, 1995.

Gallego et al. (2001)

R.A. Gallego, A.J. Monticelli, R. Romero, "Optimal capacitor placement in radial distribution networks", IEEE Transactions on Power Systems, 16(4), 630-637, Novembro 2001.

Gardel et al. (2006)

P. Gardel, B. Baran, H. Estigarribia, U. Fernandez, S. Duarte, "Multiobjective reactive power compensation with an ant colony optimization algorithm", Proceedings of the 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, 276-280, Março 2006.

Ghazi e Arabpour (2005)

R. Ghazi, A. Arabpour, "Optimal Multi-Objective VAR Planning Using Accelerated Ant Colony and Analytical Hierarchy Process Methods", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 1-7, 2005.

Ghose et al. (1998)

T. Ghose, S.K. Goswami, S.K. Basu, "Energy loss reduction in distribution system by capacitor placement through combined GA-SA technique", IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, TENCON '98, 2, 502-505, Dezembro 1998.

Ghose et al. (1999)

T. Ghose, S. K. Goswami, S. K. Basu, "Solving Capacitor placement problems in distribution systems using genetic algorithms". Electric Machines and Power Systems, 27, 429-441, 1999.

Glover (1989)

F. Glover, "Tabu Search – Part I", ORSA Journal on Computing, 1(3), 190 - 206, 1989

Glover (2000)

F. Glover, M. Laguna e R. Martí, "Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking", Control and Cybernetics, vol. 39(3) pp. 653-683, 2000.

Goldberg (1989)

D.E Goldberg, *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, 1989.

Gopalakrishnan et al. (2004)

V. Gopalakrishnan, P. Thirunavukkarasu, R. Prasanna, "Reactive power planning using hybrid evolutionary programming method", IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 3, 1319-1323, Outubro 2004.

Grainger et al. (1980)

J.J. Grainger, S.H. Lee, A.M. Byrd, K.N. Clinard, "Proper placement of capacitors for losses reduction on distribution primary feeders", Proceedings of the American Power Conference, 42, 593-603, Janeiro 1980.

Grainger e Lee (1981a)

J. J. Grainger, S. H. Lee, "Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(1), 345-352, Janeiro 1981.

Grainger e Lee (1981b)

J. J. Grainger, S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(3), 1105-1118, Março 1981.

Grainger e Lee (1982)

J. J. Grainger, S. H. Lee, "Capacity Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: A New Voltage-Dependent Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(5), 1236-1244, Maio 1982.

Grainger et al. (1983)

J. J. Grainger, S. Civanlar, S. H. Lee, "Optimal Design and Control Scheme for Continuous Capacitive Compensation of Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(10), 3271-3278, Outubro 1983.

Grainger et al. (1984)

J. J. Grainger e S. Civanlar, K.N. Clinard, L.J. Gale, "Optimal Voltage Dependent Continuous-Time Control of Reactive Power on Primary Feeders". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(9), 2714-2722, Setembro 1984.

Grainger e Civanlar (1985)

J. J. Grainger e S. Civanlar, "Volt/Var Control on distribution Systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators Part I: The overall problem". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104(11), 3278-3283, Novembro 1985.

Grudin (1989)

N. Grudin, "Reactive power optimization using successive quadratic programming method", IEEE Transactions on Power Systems, 13(4), 1219-1225, Novembro 1989.

Hajela e Lin (1992)

P. Hajela e C.-Y. Lin, "Genetic Search strategies in multicriterion optimal design". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 3 (2). Springer, 99-107, 1992.

Holland (1975)

J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, Michigan, 1975.

Horn et al. (1993)

J. Horn, N. Nafploitis e D. Goldberg, "A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization", *Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation (CEC'93)* 1, IEEE Press, 82-87, 1993.

Hsiao et al. (1993)

Y.-T. Hsiao, C.-C. Liu, H.-D. Chiang, Y.-L. Chen, "A new approach for optimal VAr sources planning in large scale electric power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 988-996, Agosto 1993.

Huang et al. (1996)

Y.-C. Huang; H.-T. Yang; C.-L. Huang, "Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using Tabu Search approach", *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(4), 1868-1873, Novembro 1996.

Iba et al. (1988)

K. Iba, H. Suzuki, K.-I. Suzuki, K. Suzuki, "Practical reactive power allocation/operation planning using successive linear programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2), 558-566, Maio 1988.

Iba (1994)

K. Iba, "Reactive power optimization by genetic algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2), 685-692, Maio 1984.

IEEE Committee Report (1972)

IEEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1967-1970", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-91(5), 1750-1759, Setembro 1972.

IEEE Committee Report (1978)

IEEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1971-1974", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97(4), 1124-1131, Julho 1978.

IEEE Committee Report (1983)

IEEE Committee Report, "Bibliography on Power Capacitors 1975-1980", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(7), 2331-2334, Julho 1983.

IEEE VAR Management Working Group Report (1987)

IEEE VAR Management Working Group Report, "Bibliography on Reactive Power and Voltage Control", IEEE Transactions on Power Systems, 2(2), 361-370, Maio 1987.

Jiang e Wang (2005)

C. Jiang, C. Wang, "Improved evolutionary programming with dynamic mutation and metropolis criteria for multi-objective reactive power optimization", IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution, 152 (2), Março 2005.

IPQ (1996)

IPQ, NP EN 50160, Edição IPQ, Fevereiro de 1996.

Iyer et al. (1984)

S.R. Iyer, K. Ramachandran, S.Hariharan, "Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(6), 1509-1515, Junho 1984.

Jwo et al. (1995)

W.-S. Jwo, C.-W. Liu, C.-C. Liu, Y.-T. Hsiao, "Hybrid expert system and simulated annealing approach to optimal reactive power planning", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 142(4), 381-385 Julho 1995.

Kaplan (1984)

M. Kaplan, "Optimization of Number, Location, Size, Control Type, and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-103(9), 2659-2665, Setembro 1984.

Kearly et al. (1991)

J. Kearly, A.Y. Chikhani, R. Hackam, M.M.A. Salama, V. H. Quintana, "Microprocessor controlled reactive power compensator for loss reduction in radial distribution feeders", IEEE Transactions Power Delivery, 6(4), 1848-1855, Outubro 1991.

Kim e You (1999)

K.-H. Kim, S.-K. You, "Voltage profile improvement by capacitor placement and control in unbalanced distribution systems using GA", IEEE Transactions Power Engineering Society Summer Meeting, 2, 800-805, Julho 1999.

Kicinger et al. (2005)

R. Kicinger, T. Arciszewski e K.A. De Jong (2005). "Evolutionary Computation and structural Design: A survey of the state of the art". *Computers & Structures*, 83 (23-23), 1933-1978, 2005.

Kirkpatrick et al. (1993)

Kirkpatrick, S., C. D. Gellat e M. P. Vecchi , "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220, 671-680, 1993.

Krami et al. (2008)

N. Krami, M.A. El-Sharkawi, M. Akherraz, "Pareto multiobjective optimization technique for reactive power planning", *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 1-6, Julho 2008.

Kuo (2003)

C.-C. Kuo, "Multiobjective programming for optimal capacitor placement and sizing in distribution feeder", *3rd International Conference Power and Energy Systems*, Setembro 2003.

Lee et al. (1995)

K.Y. Lee, X. Bai, Y.-M.Park, "Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4), 1843-1850, Novembro 1995.

Levitin et al. (2000)

G. Levitin, A. Kalyuzhny, A. Shenkman, M. Chertkov, "Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(2), 623-628, Abril 2000.

Li et al. (2005)

F. Li, J.D. Pilgrim, C. Dabeedin, A. Chebbo, R.K. Aggarwal, "Genetic algorithms for optimal reactive power compensation on the national grid system", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 493-500, Fevereiro 2005.

Matos (2003)

M.A. Matos, "A new power flow method for radial networks", *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2, Junho 2003.

Ma e Lai (1996)

J.T. Ma, L. Lai, "Evolutionary programming approach to reactive power planning", *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution*, 43 (4), Julho 1996.

Mahfoud e Goldeberg (1995)

S.W. Mahfoud e D. E. Goldeberg (1995), "Parallel recombinative simulated annealing: A genetic algorithm", *Parallel Computing* 21 (1), 1-28.

Maxwell (1960)

M. Maxwell, "The economic application of capacitors to distribution feeders", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems -Part III, PAS-79*, 353-359, Agosto 1960.

Mekhamer et al. (2002)

S.F. Mekhamer, M.E. El-Hawary, M.M. Mansour, M.A. Moustafa, S.A. Soliman, "State of the art in optimal capacitor allocation for reactive power compensation in distribution feeders", *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering LESCOPE 02*, 61-75, Junho 2002.

Mekhamer et al. (2003)

S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, M. E. El-Hawary, "Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders", *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), 206-213, Fevereiro 2003.

Milošević e Begović (2004)

B. Milošević e M. Begović, "Capacitor placement for conservative voltage reduction on distribution feeders". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3), 1360-1367, Julho 2004.

Mori e Ogita (1999)

H. Mori, Y. Ogita, , "Capacitor placement using parallel tabu search in distribution systems", *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 6, 521-526, Outubro 1999.

Mori e Ogita (2000)

H. Mori, Y. Ogita, , "Voltage Parallel tabu search for capacitor placement in radial distribution systems", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000, 4, 2334-2339, Janeiro 2000.

Neagle e Samson (1956)

N.M. Neagle e D.R. Samson, "Loss reduction from capacitors installed on primary feeders", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Power Apparatus and Systems - Part III, PAS-75*, 950-959, Outubro 1956.

Neimane (2001)

Viktoria Neimane, "On development planning of electricity distribution networks", *Doctoral Dissertation*, Royal Institute of Technology – Department of Electrical Engineerin, Electric Power system, Stockholm, 2001.

Ng e Salama (1995)

H.N. Ng, M.M.A. Salama, "Fuzzy optimal capacitor sizing and placement", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2,680-683, Setembro 1995.

Ng et al. (2000)

H.N. Ng, M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques", IEEE Transactions on Power Delivery, 15(1), 387-392, Janeiro 2000.

Nimura et al. (1993)

T. Nimura, R. Yokoyama, B.J. Cory, "A fuzzy coordination approach for multi-objective voltage and reactive power scheduling of an electric power system", Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1, 267-272, 1993.

Noureddine e Chandrasekaran (1992)

A.H. Noureddine, A. Chandrasekaran, "Automatic Linear Programming Approach to Loss Minimization and Capacitor Sizing and Placement", System Theory, 1992. Proceedings. SSST/CSA 92. The 24th Southeastern Symposium on System Theory and the 3rd Annual Symposium on Communications, Signal Processing Expert Systems, and ASIC VLSI Design, 454-458, Março 1992.

Pretelt (1965)

A.M. Pretelt, "Automatic allocation of network capacitors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-90(1), 54-61, Janeiro 1971.

Pires (2001)

D.F. Pires, "Modelo multiobjectivo para apoio à localização de condensadores em redes radiais de distribuição", Tese de Mestrado em Sistemas e automação. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Novembro 2001.

Pires et al. (2005)

D. F. Pires; A.G. Martins, C.H. Antunes, "A multiobjective model for VAR planning in radial distribution networks based on tabu search", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 20(2), 1089-1094, Maio 2005.

Pires et al. (2006)

D. F. Pires; A.G. Martins, C.H. Antunes, "A genetic multiobjective approach to capacitor location in distribution networks", Proceedings of the 19th Mini-EURO Conference on Operational Research Models and Methods in the Energy Sector, Setembro 2006.

Pires et al. (2007a)

D.F. Pires, C. Henggeler Antunes, A. Gomes Martins, "Multi-Objective Evolutionary Approaches for Reactive Power Planning in Electrical Networks - an Overview", International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2007), 539-544, Setúbal-Portugal, Abril 2007.

Pires et al. (2007b)

D.F. Pires, C.H. Antunes, A.G. Martins, "An NSGA-II based approach to VAR planning in radial distribution networks", The Seventh Metaheuristics International Conference, Junho 2007.

Prins (2003)

C. Prins, "A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem". Computers & Operations Research 31(12), pp. 1985-2002, 2003.

Qui e Shahidehpour (1987)

J. Qiu, S. M. Shahidehpour, "A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile", IEEE Transactions on Power Systems, 2(2), 287-295, Maio 1987.

Ramos et al. (2004)

R. Ramos, J. Vallejos, B. Barán, "Multi-objective reactive power compensation with voltage security", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference Exposition: Latin America, 302-307, 2004.

Rechenberg (1973)

I. Rechenberg, Evolutionsstrategie – optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution, Stuttgart, Fommann-Holzboog, 1973.

Rosenberg (1967)

R.S. Rosenberg, "Simulation of genetic populations with biochemical properties" PhD dissertation. University of Michigan, 1967.

Rivas-Dávalos et al. (2007)

F. Rivas-Dávalos, E. Moreno-Goytia, G. Gutiérrez-Alacaraz, J. Tovar-Hernández, "Evolutionary multi-objective optimization in power systems: state-of-art", Proceedings of PowerTech2007 , 2093-2098, Julho 2007.

Salama et al. (1985)

M. M. A. Salama, N. Manojlovic, V. H. Quintana e A. Y. Chikhani, "Real-time optimal reactive power control for distribution networks", Electrical Power and Energy Systems, 18(3), 185-193, 1996.

Salama e Chikhani (1993)

M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani, "A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3), 1529-1535, Julho 1993.

Santos et al. (2004)

J. R. Santos, A. G. Expósito, J. L. M. Ramos, "A reduced-size genetic algorithm for optimal capacitor placement on distribution feeders". IEEE Melecon, Croatia, 963-966, May, 2004.

Schaffer, J. D. (1984)

J. D. Schaffer "Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms". Doctoral dissertation, Vanderbilt University, Electrical Engineering, Tennessee, 1984.

Schaffer (1985)

J. D. Schaffer, "Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms", Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, 93-100, 1995.

Schmill (1965)

J.V. Schmill, "Optimum size and location of shunt capacitors on distribution feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-84(9), 825-832, Setembro 1965.

Schwefel (1981)

H.-P. Schwefel, *Numerical Optimization of Computer Models*, Wiley, Chichester, 1981.

Shao et al. (1994)

J. Shao, N.D. Rao, Y. Zhang, "A capacitor placement expert system," International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, 105-114, Junho 1994.

Sörensen (2003)

K. Sörensen, "A framework for robust and flexible optimization using metaheuristics". Ph D. Thesis. University of Antwerp, 2003.

Souza (2004)

B.A. Souza, H.N. Alves, H.A. Ferreira, "Microgenetic algorithms and fuzzy logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks", IEEE Transactions on Power Systems, 19(2), Maio 2004.

Srinivas and Deb (1993)

Srinivas, N. and K. Deb, "Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms" in *Evolutionary Computing*, 2(3) pp. 221-238, 1993.

Su e Lee (2002)

C.-T. Su, C.-S. Lee, "Modified differential evolution method for capacitor placement of distribution systems", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, 1, 208-213, Outubro 2002.

Sundhararajan e Pahwa (1994)

S. Sundhararajan, A. Pahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(9), 1499-1507, Agosto 1994.

Thirunavukkarasu et al. (2004)

P. Thirunavukkarasu, R. Prasanna, T.A.A. Victoire, "Reactive power planning using hybrid method", *International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004*, 2, 1694-1698, Novembro 2004.

Vaahedi et al. (1999)

E. Vaahedi, J. Tamby, Y. Mansour, W. Li, D. Sun, "Large scale voltage stability constrained optimal VAR planning and voltage stability applications using existing OPF/optimal VAR planning tools", *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1) 65-74, Fevereiro 1999.

Vallejos et al. (2006)

J. Vallejos, U. Fernández, R. Ramos, "Multiobjective reactive power compensation applied to the Paraguayan power system", *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC '06*, 1-6, Agosto 2006.

Veldhuizen e Lamont (1998)

D.A.V. Veldhuizen e G.B. Lamont, "Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis". Technical Report TR-98-03, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1998.

Venkataramana et al. (1987)

A. Venkataramana, J. Carr, R.S. Ramshaw, "Optimal Reactive Power Allocation", *IEEE Transactions on Power Systems*, 2(1), 138-144, Fevereiro 1987.

Venkatesh et al. (1999)

B. Venkatesh, G. Sadasivam, M.A. Khan, "Optimal reactive power planning against voltage collapse using the successive multiobjective fuzzy LP technique", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 146(4),343-348, Julho 1999.

Vlachogiannis e Lee (2005)

J. G. Vlachogiannis, K.Y. Lee, "Reactive power control based on particle swarm multi-objective optimization", Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, Novembro 2005.

Wang et al. (1997)

J.C. Wang, H.-D. Chiang, K.N. Miu, G. Darling, "Capacitor placement and real time control in large-scale unbalanced distribution systems: numerical studies", IEEE Transactions on Power Delivery, 12(2), 959-964, Abril 1997.

Westinghouse Electric Corporation (1965)

Westinghouse Electric Corporation, Distribution Systems - Electric Utility Engineering Reference Book, Vol. 3 , Janeiro 1965.

Zhu et al. (1998)

J.Z. Zhu, C.S. Chang, W. Yan, G.Y. Xu, "Reactive power optimisation using an analytic hierarchical process and a nonlinear optimisation neural network approach", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 145(1), 89-97, Janeiro 1998.

Zitzler e Thiele (1998)

E. Zitzler e L. Thiele, "An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength Pareto approach". Technical Report 33, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK). Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 1998.

Zitzler et al. (2001)

E. Zitzler, M. Laumanns e L. Thiele, "SPEA 2: Improving the Strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization". Proceedings of the EUROGEN 2001 – Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems. K. C. Giannakoglou et al. (Eds.), 95-100, 2001.

ANEXO

Dados da Rede Eléctrica EDP

Tabela 1 do Anexo – Dados dos alimentadores.

Nó de partida	Nó de chegada	r (Ω)	x (Ω)	Nó de partida	Nó de chegada	r (Ω)	x (Ω)	Nó de partida	Nó de chegada	r (Ω)	x (Ω)
1	2	0,112	0,1873	40	41	0,5177	0,2892	79	80	1,1738	0,6556
2	3	0,0763	0,1274	41	42	0,7148	0,3992	80	81	0,619	0,3457
3	4	0,1891	0,3161	8	43	1,0575	0,2785	81	82	0,5684	0,3174
4	5	0,2243	0,3749	43	44	0,5198	0,2903	20	83	0,8393	0,3011
5	6	0,2571	0,4297	44	45	0,3341	0,1866	83	84	0,2133	0,1191
6	7	0,134	0,2239	9	46	0,349	0,1949	84	85	0,3645	0,2036
7	8	0,2986	0,4991	10	47	0,5771	0,3223	85	86	0,3206	0,1791
8	9	0,1953	0,3265	47	48	0,3598	0,2009	22	87	0,7675	0,4286
9	10	0,5097	0,8519	48	49	0,7688	0,4294	24	88	1,5914	0,5709
10	11	1,5303	1,5101	49	50	0,2599	0,1451	25	89	0,702	0,3921
11	12	0,1889	0,1864	50	51	0,8654	0,4833	25	90	20,743	0,7441
12	13	0,1816	0,1793	10	52	0,5248	0,5179	90	91	0,678	0,2432
13	14	0,0661	0,0653	52	53	0,1737	0,1714	91	92	0,5738	0,3205
14	15	0,4115	0,4061	53	54	0,6148	0,6068	27	93	0,5913	0,3303
15	16	0,2584	0,255	54	55	0,198	0,1954	28	94	1,1865	0,3124
16	17	0,2033	0,2006	55	56	0,198	0,1954				
17	18	0,7243	0,7148	56	57	0,285	0,2813				
18	19	0,2162	0,2134	57	58	0,1429	0,141				
19	20	0,35	0,3454	58	59	0,3409	0,1904				
20	21	1,4775	0,3891	59	60	0,3679	0,2055				
21	22	0,45	0,1185	60	61	0,3591	0,2006				
22	23	0,771	0,203	61	62	0,3503	0,1957				
23	24	0,885	0,2331	62	63	0,4219	0,2356				
24	25	0,9915	0,2611	63	64	1,538	0,5517				
25	26	0,384	0,1011	64	65	0,9788	0,3511				
26	27	0,7245	0,1908	65	66	1,4911	0,5349				
27	28	1,185	0,3121	11	67	0,969	0,2552				
28	29	1,2353	0,6899	67	68	0,6705	0,1766				
29	30	0,3557	0,1987	12	69	0,4354	0,2432				
30	31	0,9494	0,3406	13	70	0,4631	0,2586				
31	32	0,6899	0,3853	70	71	0,2707	0,1512				
32	33	1,5707	0,8773	15	72	0,6683	0,3732				
5	34	1,2655	0,454	72	73	0,8525	0,4762				
5	35	0,1688	0,0943	16	74	0,3314	0,1851				
35	36	0,2741	0,1531	18	75	0,405	0,2262				
36	37	0,2552	0,1425	19	76	0,4367	0,2439				
6	38	0,4165	0,2326	19	77	0,3416	0,1908				
6	39	1,4835	0,3907	77	78	0,2113	0,118				
39	40	1,8	0,474	78	79	1,1249	0,4035				

Tabela 2 do Anexo – Dados das potências tomadas nos nós da rede².

Número do Barramento	Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (KVAR)	Número do Barramento	Potência Activa (kW)	Potência Reactiva (KVAR)
2	22,5	10,9	57	31,5	15,3
3	240,3	116,4	58	521,1	252,4
4	24,3	11,8	59	212,4	102,9
7	28,8	14	60	39,6	19,2
14	57,6	27,9	61	45	21,8
17	18,9	9,2	62	17,1	8,3
20	55,8	27	63	21,6	10,5
21	40,5	19,6	64	35,1	17
23	54	26,2	65	70,2	34
26	46,8	22,7	66	34,2	16,6
29	13,5	6,5	67	22,5	10,9
30	3,6	1,7	68	45,9	22,2
31	18	8,7	69	33,3	16,1
32	21,6	10,5	70	36,9	17,9
33	9	4,4	71	45	21,8
34	64,8	31,4	72	75,6	36,6
35	65,7	31,8	73	67,5	32,7
36	59,4	28,8	74	27,9	13,5
37	13,5	6,5	75	38,7	18,7
38	161,1	78	76	53,1	25,7
39	26,1	12,6	77	65,7	31,8
40	134,1	65	78	63	30,5
41	85,5	41,4	79	67,5	32,7
42	41,4	20,1	80	45	21,8
43	41,4	20,1	81	9	4,4
44	41,4	20,1	82	16,2	7,8
45	21,6	10,5	83	67,5	32,7
46	25,2	12,2	84	296,1	143,4
47	45,9	22,2	85	72	34,9
48	36,9	17,9	86	76,5	37,1
49	63,9	31	87	90,9	44
50	68,4	33,1	88	72	34,9
51	27,9	13,5	89	63	30,5
52	81	39,2	90	21,6	10,5
53	69,3	33,6	91	36,9	17,9
54	62,1	30,1	92	20,7	10
55	35,1	17	93	17,1	8,3
56	205,2	99,4	94	90	43,6

² Não constam na tabela os nós que não alimentam nenhuma carga (P=0 W e Q=0 VAR).

