VASCO EDUARDO GRAÇA DOS SANTOS

UMA ABORDAGEM MULTI-OBJECTIVO PARA A INCLUSÃO DE GERAÇÃO DISPERSA NO PLANEAMENTO DA EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
2009

VASCO EDUARDO GRAÇA DOS SANTOS

UMA ABORDAGEM MULTI-OBJECTIVO PARA A INCLUSÃO DE GERAÇÃO DISPERSA NO PLANEAMENTO DA EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores,
Especialidade em Sistemas de Energia

Orientação de:

Prof. Doutor António Gomes Martins
e
Prof. Doutor Carlos Henggeler Antunes

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
2009

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Gomes Martins pela sua total disponibilidade, supervisão e acompanhamento científico indispensáveis para a realização deste trabalho. Os seus incentivos, apoio e colaboração na discussão dos mais variados assuntos relacionados com os temas tratados foram de primordial importância no desenrolar desta dissertação.

Ao Professor Doutor Carlos Henggeler Antunes pela sua total disponibilidade, compreensão das dificuldades, supervisão e apoio científico. Tendo todos estes estímulos sido indispensáveis para o meu despertar e familiarização com algumas das ferramentas que nos permitem lidar e simular a multi-objectividade associada aos problemas do mundo real.

A ambos não posso deixar de reconhecer as suas qualidades humanas, capacidade de trabalho, o bom ambiente de trabalho e camaradagem e acima de tudo a amizade manifestada.

Ao Doutor Carlos Barrico quero agradecer a sua disponibilidade e ajuda no esclarecimento de algumas questões relacionadas com a elaboração do software de simulação programado em Delphi.

Ao Engº Rui Sampaio da *EDP*, pela sua amabilidade, disponibilidade no tratamento de alguns assuntos que se prenderam com as redes de distribuição e pelos dados facultados.

Ao Engº Fernandes Matos da *SONAE Energia*, pela sua disponibilidade no tratamento de questões técnicas, pelos contactos e informação que me disponibilizou sobre tecnologias de Geração Distribuída.

Um agradecimento muito especial à minha família pelo carinho e compreensão.

A todos aqueles que não sendo aqui directamente referidos, mesmo sendo tão importantes, um muito bem-haja e desculpem a maçada.

ÍNDICE GERAL

RESUMO

1. INTRODUÇÃO.....1

1.1. Uma proposta para localizar e dimensionar unidades GD em redes de distribuição 5

1.2. Organização do trabalho..... 7

2. A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NUM MERCADO EM TRANSFORMAÇÃO.....9

2.1. Motivação da Geração Distribuída 13

2.1.1. Visão Europeia 14

2.1.2. Visão Portuguesa 15

2.2. Cenário de Aplicação 18

2.3. Vantagens e desvantagens da Geração Distribuída 19

2.4. O futuro da GD 22

2.5. Conclusão.....26

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....27

3.1. Algoritmos Genéticos 27

3.2. Simulated Annealing.....31

3.3. Tabu Search.....32

3.4. Abordagens Híbridas.....33

3.5. Outros métodos.....34

3.6. Trânsitos de Potência em Redes de Distribuição 35

3.7. Considerações finais.....36

4. OPTIMIZAÇÃO MULTI-OBJECTIVO E AGS.....37

4.1. Optimização Multi-objectivo.....37

4.2. Algoritmos Evolucionários 42

4.3. Algoritmos Genéticos 44

4.3.1. Estrutura do algoritmo.....44

4.3.2. Codificação das variáveis.....46

4.3.3. Inicialização e dimensão da população 46
4.3.4. Avaliação da aptidão dos indivíduos da população 47
4.3.5. Selecção 47
4.3.6. Elitismo 50
4.3.7. Cruzamento 51
4.3.8. Mutação 54
4.3.9. Substituição da população 55
4.3.10. Critério de paragem 55
4.3.11. Parametrização 56
4.3.12. Controlo da Diversidade 56
4.4. Optimização multi-objectivo usando AGs 59
4.4.1. Algoritmos evolucionários multi-objectivo 61
4.4.2. Restrições 66
4.4.3. Estrutura de preferências do AD 67
4.4.4. Métricas de desempenho 69
4. 5. Robustez em Problemas Multi-Objectivo 73
4.5.1. Grau de Robustez 75

5. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM AG PARA A LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE GD, BCS E DRA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM BASE NUM MODELO MULTI-OBJECTIVO 79
5.1. Introdução 79
5.2. Modelo Multi-objectivo 82
5.2.1. Nomenclatura 83
5.2.2. Modelo Matemático 85
5.2.3. Cálculo do atributo “Potência Fornecida” 89
5.3. Uma abordagem baseada em AG Multi-Objectivo 90
5.3.1. Caracterização do AG implementado 93
5.3.2. Medida de Desempenho 95
5.3.3. Geração da população inicial 97
5.3.4. Selecção por torneio 98
5.3.5. Operadores Genéticos 98
5.3.6. O Algoritmo Desenvolvido 100
5.4. Conclusão 101

6. ESTUDO DE CASOS.....103
6.1. Algumas opções metodológicas.....103
6.1.1. Redes de distribuição.....103
6.1.2. Baterias de condensadores.....104
6.1.3. Tecnologias GD.....105
6.1.4. Disjuntores Remotamente Accionados …..106
6.1.5. Cenários de carga.....107
6.1.6. Cenários de Avaria.....110
6.2. Resultados Ilustrativos das redes.....111
6.2.1. Rede de distribuição de 94 nós.....111
6.2.2. Rede de distribuição de 86 nós.....125
6.3. Discussão de resultados.....139
6.4. Conclusão.....142

7. CONCLUSÕES E PISTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....143
7.1 Principais contribuições.....145
7.2. Desenvolvimentos futuros.....146

BIBLIOGRAFIA.....149

ANEXO A: Método de Análise do Trânsito de Potência.....161
ANEXO B: Topologia das Redes em Estudo.....167
ANEXO C: Dados das redes em estudo.....171
ANEXO D: Resultados da Aplicação da Ferramenta Desenvolvida às redes em Estudo.....177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura dos Sistemas de Potência Convencionais (Angelopoulos, 2004). 10
Figura 2.2 – Estrutura dos Sistemas de Potência com GD (Angelopoulos, 2004). 11
Figura 2.3 - Percentagem de energia renovável no consumo global da UE em 2005 vs alvos para 2020. Fonte: http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects (consultado em Junho de 2009) .. 23
Figura 2.4 – Esquema de uma VPP. 24
Figura 2.5 - Controlo descentralizado (Jiménez, 2006). 25
Figura 2.6 - Controlo centralizado (Jiménez, 2006). 25
Figura 4.1 – Espaço das variáveis e espaço dos objectivos (Costa, 2003). 40
Figura 4.2 – Soluções óptimas de Pareto 40
Figura 4.3 – Frentes óptimas de Pareto locais e globais (Deb, 2001). 41
Figura 4.4 - Fluxograma do funcionamento básico do algoritmo genético 44
Figura 4.5 - Cruzamento de um ponto 52
Figura 4.6 - Cruzamento de dois pontos 52
Figura 4.7 - Cruzamento Uniforme 53
Figura 4.8 – Mutação 55
Figura 4.9 - Conjunto de soluções agrupadas em nichos (Deb, 2001). 61
Figura 4.10 – "Distância ao aglomerado" (Deb, 2001). 63
Figura 4.11 – Caso exemplificativo em que o algoritmo NSGA II pode gerar soluções óptimas e não óptimas de Pareto (Deb, 2001). 64
Figura 4.12 – As duas metas da optimização multi-objectivo (Deb, 2001) 69
Figura 4.13 – Diversidade e convergência na Frente de Pareto (Deb, 2001). 70
Figura 4.14 - Diversidade e convergência na Frente de Pareto. (Deb, 2001) 70
Figura 4.15 - Definições das vizinhanças nos espaços das variáveis de decisão e das funções objectivo (para espaços bidimensionais e todas as funções a minimizar), (Barrico e Antunes, 2007). 76
Figura 5.1 – Estrutura de uma solução. 91
Figura 5.2 – Fluxograma geral do AG desenvolvido para a selecção e localização de tecnologias GD, BC e DRA em redes de distribuição. 93
Figura 5.3 – Distribuição das soluções por frentes (para duas funções objectivo). 96
Figura 6.1 - Diagrama de carga típico da rede de distribuição nacional de MT. 108
Figura 6.2 – Curva aproximada da zona da ponta dos diagramas de carga. 108
Figura 6.3 – Distribuição das pontas no intervalo 18 – 22 horas. 109
Figura 6.4 – Representação parcial do diagrama de carga, entre as18 e as 22 horas, considerado para as redes de distribuição de 94 e 86 nós. 110
Figura 6.5 – População final com 40 soluções para a rede de 94 nós 112
Figura 6.6 – População final (com atributo PF). 117
Figura 6.7 – Rede de 94 nós com DG, BCs, DRA e sinalização de avarias, solução 39. 120
Figura 6.8 – População final versus população inicial 121
Figura 6.9 – Populações finais associadas aos melhores resultados dos vários tipos de cruzamento. 122
Figura 6.10 – Populações finais (usando o mesmo conjunto de parâmetros) para diferentes populações iniciais. 123
Figura 6.11 – Populações finais associadas aos melhores resultados obtidos. 124

Figura 6.12 – Populações finais associadas aos melhores resultados (indicação das soluções por graus de robustez). 125
Figura 6.13 – População final com 50 soluções para a rede de 86 nós 126
Figura 6.14 – População final evidenciando o atributo Potência fornecida 130
Figura 6.15 – Rede de 86 nós com DG, BCs, DRA e sinalização de avarias, solução 3. 134
Figura 6.16 – População final versus população inicial 135
Figura 6.17 – Populações finais associadas aos melhores resultados dos vários tipos e cruzamento. 136
Figura 6.18 – Populações finais (Usando o mesmo conjunto de parâmetros: NP=40; NP_S=50; E=2; k_{Torn}=2; 5000 gerações; p_m=0,1 e p_c=1) 137
Figura 6.19 – Populações Finais associadas aos melhores resultados obtidos. 138
Figura 6.20 – Populações finais associadas aos melhores resultados (indicação das soluções por graus de robustez). 139
Figura A.1 – Rede radial com identificação dos nós, troços e alimentadores. 163
Figura B.1 – Topologia da rede de distribuição de 94 nós, retirada de Pires et al. (2001). 168
Figura B.2 – Topologia da rede de distribuição de 86 nós. 169

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Custos por kW instalado de algumas tecnologias GD (consulta realizada directamente às empresas acima mencionadas). 22
Tabela 4.1- Comparação de terminologias 45
Tabela 4.2 - Diferentes formas de influenciar a população através do elitismo (Gomes, 2004). 51
Tabela 6.1 – Relação entre a Potência e o custo das baterias de condensadores. 104
Tabela 6.2 – Potência e custo das unidades GD utilizando diversas tecnologias. 105
Tabela 6.3 – Ano do período de planeamento em que são instaladas as unidades GD. 106
Tabela 6.4 – Ocorrências de avarias na rede de 86 nós entre 1997 e 2007. 107
Tabela 6.5 – Perdas apresentadas pela rede de 94 nós antes da instalação de GD. 111
Tabela 6.6 – Funções objectivo das soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da rede de 94 nós. 113
Tabela 6.7 – Vectores que contêm os locais de instalação e os tipos de GD, BCs e DRA das soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da melhor população final obtida. 114
Tabela 6.8 – Desvio de tensão no nó 32 antes da instalação das unidades GD e para as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da rede de 94 nós. 116
Tabela 6.9 – Redução de perdas, em percentagem, para as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 (Figura 6.5) da rede de 94 nós. 116
Tabela 6.10 – Atributo potência fornecida associado a cada uma das soluções assinaladas na figura 6.5 da rede de 94 nós. 117
Tabela 6.11 – Perdas apresentadas pela rede portuguesa de 86 nós antes de qualquer simulação do modelo 125
Tabela 6.12 – Funções objectivo das soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da rede de 86 nós. 127
Tabela 6.13 – Vectores que contêm os locais de instalação e os tipos de GD, BCs e DRA das soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da população final. 128
Tabela 6.14 – Desvio de tensão no nó 80 antes da instalação das unidades GD para as soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da rede de 86 nós. 129
Tabela 6.15 – Redução de perdas, em percentagem, para as soluções exemplo (Figura 6.13) da rede portuguesa de 86 nós. 129
Tabela 6.16 – Atributo PF associado a cada uma das soluções seleccionadas (figura 6.14) da rede de 86 nós. 130
Tabela 6.17 – Valor indicativo do investimento realizado, após a intervenção, no reforço da rede de 86 nós e respectivas perdas. 131
Tabela 6.18 – Zonas fora de serviço devido à potência fornecida ser menor do que a consumida. 133
Tabela 6.19 – Indicadores das melhorias obtidas na tensão da rede de 94 nós. 140
Tabela 6.20 – Indicadores das melhorias obtidas na tensão da rede de 86 nós. 140
Tabela C.1 – Potências activas e reactivas nos 94 nós da rede. 172
Tabela C.2 – Características dos ramos da rede de 94 nós 173
Tabela C.3 – Potências activas e reactivas nos 86 nós da rede. 174
Tabela C.4 – Características dos ramos da rede de 86 nós 175
Tabela D.1 – Perdas activas e reactivas nos vários ramos da rede de 94 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 12, 33, 38 e 39). 180
Tabela D.2 – Níveis de tensão na rede de 94 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (soluções 2, 12, 33, 38 e 39) 181

Tabela D.3 – Valores das funções objectivo e do atributo PF das soluções da população final da rede de 94 nós. 182
Tabela D.4 – Soluções (população final) da rede de 94 nós (de onde se seleccionaram as soluções 2, 12, 33, 38 e 39). 186
Tabela D.5 – Perdas activas e reactivas nos vários ramos da rede de 86 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 3, 20, 22 e 40). 189
Tabela D.6 – Níveis de tensão na rede de 86 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 3, 20, 22 e 40). 190
Tabela D.7 – Valores das funções objectivo e do atributo PF das soluções da população final da rede de 86 nós. 191
Tabela D.8 – Soluções (população final) da rede de 86 nós (de onde se seleccionaram as soluções 2, 3, 20, 22 e 40). 196

RESUMO

Nos últimos anos a geração distribuída (GD) de energia eléctrica tem sido alvo de um intenso esforço de investigação e desenvolvimento em muitos países. O reforço desta tendência deve-se essencialmente a interesses ambientais, assim como à necessidade de diversificação da matriz energética de cada país.

As políticas energéticas têm vindo a apoiar a interligação, aos sistemas de transporte e distribuição, de pequenas unidades GD de elevada eficiência e de reduzidas emissões poluentes, principalmente as baseadas em fontes renováveis. As unidades deste tipo, quando correctamente dimensionadas e localizadas na rede, resultam num conjunto de vantagens operacionais, técnicas e económicas, comparativamente com a geração centralizada. Uma vez que são localizadas junto dos pontos de consumo e se encontram distribuídas pela rede permitem a redução das perdas na rede, a redução de custos, a melhoria da qualidade da energia fornecida e uma maior disponibilidade do sistema face a interrupções da geração centralizada minimizando os seus efeitos.

A localização e o dimensionamento das unidades GD na rede de distribuição pode ser efectuada através da análise de diversos aspectos: técnicos, ambientais, financeiros, sociais, etc. Assim, foi desenvolvido um modelo de programação multi-objectivo incorporando explicitamente várias dimensões que contribuem para avaliar o mérito das soluções alternativas. A natureza combinatória deste problema e o carácter conflituoso dos objectivos levou à opção metodológica por uma abordagem meta-heurística baseada no *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA II) para o cálculo das soluções não-dominadas (óptimas de Pareto). No algoritmo genético (AG) desenvolvido com base no NSGA-II é incorporado o conceito de robustez, contribuindo de forma directa para o cálculo do valor da função de aptidão associado às soluções, com a intenção de conduzir a pesquisa para soluções de melhor qualidade e mais diversificadas para a tomada de decisões.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para localização e dimensionamento de unidades de GD, baterias de condensadores (BCs) e disjuntores remotamente accionados (DRA) em redes de distribuição radiais de média tensão. O modelo matemático considera como funções objectivo, a minimização das perdas do sistema (determinar as potências activas e reactivas a serem injectadas nos nós da rede pelas unidades GD e BCs) e a minimização dos custos de investimento. Além

do cálculo das soluções na Frente de Óptima de Pareto para este modelo com duas funções objectivo, foi acrescentado um atributo adicional, designado "potência fornecida", a cada solução, que se destina a ajudar o agente de decisão (AD) na escolha da solução a adoptar dotando-o de mais informação relevante. Este atributo resulta de um processo de geração de avarias (baseado na taxa de avarias nos ramos da rede) e nas zonas em que se encontra dividida a rede, resultante da localização dos DRA. Estas zonas permitem a alimentação total ou parcial das cargas de forma isolada em caso de avaria num ramo qualquer da rede. Isto é, todas as zonas sem avaria e com unidades GD instaladas continuam a alimentar as suas cargas; no entanto, se a potência solicitada pelas cargas for maior do que a fornecida pelas unidades GD dessa mesma zona é realizado um deslastre de cargas por prioridades.

ABSTRACT

In the past years many countries have assumed Distributed Generation (DG) of electricity as a major goal of research. This interest derives from environmental aspects and the need of diversification of the energy matrix of each country. This trend goes along with the emergence of energy policies that support the interconnection of transmission and distribution systems, power generation using hi-tech DG units associated with low emission technologies, especially those based on renewable sources.

Units of this type when properly sized and located in the network result in a number of operational, technical and economic advantages compared with the centralized generation. Once these units are located close to consumption points and distributed over the network they allow for the reduction of losses in the network, cost savings, improving the quality of delivered energy and providing greater system availability in the face of interruptions of centralized generation, minimizing the impacts of blackouts.

The location and sizing of DG units in the distribution network can be made through the analysis of various aspects: technical, environmental, financial, and social. Thus, we developed a multi-objective programming model explicitly incorporating several dimensions that contribute to evaluate the merits of alternative solutions. The combinatorial nature of this problem and the conflicting nature of objectives led to the methodological option of resorting to a meta-heuristic approach based on the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II) for computing non-dominated (Pareto optimal) solutions. The genetic algorithm (GA) developed based on the NSGA-II approach incorporates the concept of robustness, which contributes directly to the computation of the value of the fitness function associated with the solutions, with the aim of directing the search to better quality and more diversified solutions, thus providing the decision-maker (DM) with better information for decision making purposes.

This thesis presents a methodology to locate and size DG units, capacitors (BCs) and protection devices named remotely controlled reclosers (DRA) in medium voltage radial distribution networks. The mathematical model considers two objective functions to be minimized: the system losses (that depends on the size and location of the DG units and capacitors that inject active and reactive power into the network nodes) and the investment costs. Besides the computation of solutions in the optimal Pareto front in the bi-objective model, an additional attribute was added to each solution, named "delivered power", aimed at aiding the decision maker in the choice of a solution by providing more relevant information. This attribute is the result of a process that generates failures in the network branches (based on the failure rates in each branch of the network) and in the areas defined by the location of DRA in the network. In case of a failure in a branch of the network, the areas without failures that have DG units are allowed to operate temporarily in isolation forming "islands". These "islands" or areas with undamaged branches and with GD installed units continue to feed their loads; however, if the power required by the loads is greater than that provided by DG units of that area a load shedding process based on priorities takes place.

GLOSSÁRIO

AD – Agente de Decisão

ANEEL - Agência Nacional de Energia Eléctrica

AG – Algoritmo Genético

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

BC – Bateria de Condensadores

CHP - *Combined Heat and Power*

CIGRE - *Conseil International des Grands Réseaux Electriques*

CIRED - *Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution*

DRA – Disjuntores Remotamente Accionados

Eurostat - *Statistical Office of the European Communities*

EDP – Energias de Portugal

EPRI - *Electrical Power Research Institute*

ERSE – Entidade Reguladora do Sector Eléctrico

EIA – *Energy Information Administration* do Departamento de energia dos Estados Unidos.

EUA – Estados Unidos da América.

GC – Geração Centralizada

GD – Geração Distribuída

MAIFI - *Momentary Average Interruption Frequency Index*

MCI – Motor de Combustão Interna

MOGA - *Muli-objective Genetic Algorithm*

MPFE - *Maximum Pareto Front Error*

NPGA - *Niched Pareto Genetic Algorithm*

NSGA - *Non dominated Sorting Genetic Algorithm*

ObsER – Observatório das Energias Renováveis

ONS – Operador Nacional do Sistema

PAES - *Pareto Archived Evolution Strategy*

PF – Potência Fornecida

PNAEE - Plano Nacional de Acção para Eficiência Energética

PPEC - Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de energia eléctrica

PRE - Produtor em Regime Especial

PRE-R - Produtor em Regime Especial Renovável

PRODIST - Procedimentos da Distribuição

PT – Posto de Transformação

RMOGA – *Robust Muli-objective Genetic Algorithm*

SAIDI – *System Average Interruption Duration Index*

SAIFI – *System Average Interruption Frequency Index*

SDC - Método da soma de correntes

SDP – Método baseado na impedância nodal implícita

SE – Subestação

SEE – Sistema de Energia Eléctrica

SEI – Sistema Eléctrico Independente

SEN – Sistema Eléctrico Nacional

SENV - Sistema Eléctrico Não Vinculado

SEP - Sistema Eléctrico de serviço Público

SPEA - *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*

TP - Trânsito de Potência

THD - *Total Harmonic Distortion*

UE - União Europeia

VEGA - Vector Evaluated Genetic Algorithm

VPP - *Virtual Power Plants*

WADE - *World Alliance for Decentralized Energy*

Quando for necessário referir o plural de alguma destas abreviaturas, acrescenta-se um “s” minúsculo. Por exemplo, AGs significa Algoritmos Genéticos.

Há, termos em inglês que se encontram integrados, quer na oralidade, quer até na escrita em português pelo que se usam os respectivos acrónimos em inglês.

1. INTRODUÇÃO

As exigências energéticas da sociedade actual, motivadas pelo crescimento populacional e económico, bem como pelo desenvolvimento tecnológico, são responsáveis pelo aumento global do consumo de energia eléctrica e pela crescente necessidade de sistemas de distribuição com elevados índices de qualidade e fiabilidade. Para dar resposta ao aumento da procura e às exigências impostas pelas cargas, foram implementadas soluções, tais como: construção de grandes centrais de produção, subestações e redes de transporte de energia eléctrica, expansão e modernização dos sistemas de distribuição, criação de programas de incentivo ao uso racional da energia e adopção de tecnologias usando energias renováveis criando uma maior diversificação de fontes energéticas, melhorando a sustentabilidade dos recursos energéticos. Em contrapartida, o apelo mundial para a protecção do meio ambiente e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito de estufa, passaram a actuar como factores limitadores à construção de grandes centrais. Por um lado, apesar das centrais hidroeléctricas apresentarem eficiências elevadas, dispõem de uma margem limitada para expansão da capacidade de produção, devido aos impactos negativos causados sobre as comunidades que habitam as regiões vizinhas assim como sobre os habitats, inundando extensas áreas de terrenos férteis e modificando o clima local. Por outro lado, as chuvas ácidas associadas às emissões de SO_2 para a atmosfera resultantes do funcionamento das centrais termoeléctricas servem, da mesma forma, para reforçar a ideia de que novos modelos de fornecimento de energia eléctrica necessitam ser implementados e incentivados pelos governos, empresas produtoras e distribuidoras de energia eléctrica. Estes modelos podem reflectir planos de acção integrados entre governos de diferentes países, concessionárias, investidores e consumidores com o objectivo de se obterem soluções que satisfaçam as necessidades de toda a sociedade.

Em alternativa à construção de grandes centrais de produção de energia eléctrica e ao reforço das redes surge a geração distribuída (GD), que consiste em pequenas centrais de produção de energia eléctrica, localizadas junto dos pontos de consumo (esta proximidade dos pontos de consumo depende do tipo de tecnologia GD, assim como da sua fonte de energia). Neste novo paradigma, são de salientar os aspectos que dão resposta às necessidades e preocupações supracitadas. As soluções tecnológicas das unidades GD existentes podem ser de índole renovável ou não renovável.

No que se refere às tecnologias de origem renovável (mini-hídricas, fotovoltaica e eólica), as suas capacidades de produção estão profundamente dependentes das características ambientais de cada região (abundância de água, sol e vento), não podendo, portanto, ser instaladas em qualquer local; para além disso, estão dependentes da aleatoriedade e intermitência das suas fontes de energia. Quanto às tecnologias de índole não renovável (grupos electrogéneos, microturbinas, turbinas a gás/vapor, pilhas de combustível, etc.) têm apresentado significativos progressos tecnológicos nos últimos anos. As pilhas de combustível associadas a tecnologias de índole renovável para produção de hidrogénio (H_2) e oxigénio (O_2), podem constituir sistemas híbridos de produção e armazenamento de energia permitindo melhor rentabilizar a intermitência destas fontes de energia. Além disso, assim como outras tecnologias GD, produzem energia térmica que pode ser aproveitada de forma racional em sistemas de cogeração.

No actual cenário de aumento da procura, requisitos de qualidade da energia eléctrica e preocupações ambientais, a GD, também designada por geração dispersa, apresenta-se como uma promissora perspectiva para as empresas do sector eléctrico para expansão da capacidade de fornecimento de energia e melhoria das características operacionais a curto prazo. Ao garantir a expansão da oferta, a redução das perdas técnicas e o aumento da qualidade da energia comercializada, as concessionárias tendem a elevar o seu potencial económico dentro do ambiente competitivo do mercado de energia eléctrica, obtendo benefícios tanto para si como para os consumidores (Patterson, 1999).

Por outro lado, a reestruturação dos sectores energéticos, incluindo a desverticalização dos sistemas eléctricos, têm imposto às concessionárias a constante procura de acções que resultem na utilização óptima dos recursos financeiros disponíveis e, ao mesmo tempo, resultem na melhoria da qualidade dos serviços oferecidos (Willis, 2000). Neste contexto, é de extremo interesse das

concessionárias o domínio de novas tecnologias, como as de GD, que possam contribuir para adequação às exigências dos órgãos reguladores e melhoria da qualidade dos serviços oferecidos aos clientes. No entanto, as unidades de GD enfrentam ainda algumas barreiras de ordem técnica, comercial, ambiental e legal. De entre estas, podem-se destacar os elevados investimentos necessários à aquisição dos equipamentos, regulamentação mais adequada (interligação com a rede, etc.) e políticas de incentivo às novas formas de produção de energia muito direccionadas a determinadas tecnologias. Por estas razões e devido às restrições orçamentais, técnicas e de qualidade de serviço, é importante que as empresas tenham em conta o maior número possível de variáveis associadas à GD de modo a que a sua operação se traduza em bons resultados.

As redes de distribuição, tradicionalmente passivas, normalmente projectadas para um fluxo unidireccional de potência desde a subestação até aos consumidores finais, não foram geralmente concebidas para suportar a inserção de unidades GD. Consequentemente, inúmeros estudos têm demonstrado que a integração da GD nestas redes cria desafios técnicos e económicos, tanto nas redes de distribuição como nos sistemas de transporte. Neste domínio, a transformação das redes em redes activas e de trânsito de potência bidireccional, associada ao desenvolvimento de um conjunto de equipamentos (de protecção, interligação, entre outros) e tecnologias de informação e comunicação (TIC) que permitam que este novo paradigma se torne realidade, será responsável pela transformação das actuais redes estáticas em redes dinâmicas utilizando o princípio de funcionamento da internet (Jenkins, 2000; Willis, 2000).

Perante este novo cenário, torna-se necessário avaliar os impactos técnicos da GD nos sistemas de energia, de forma a evitar a degradação da qualidade e fiabilidade da energia fornecida. Neste sentido, o problema da localização da GD tem sido estudado por vários autores, considerando diversos aspectos tais como o trânsito de potência, perdas nas redes, regulação da tensão, perfil de tensão, potências de curto-circuito, dispositivos de protecção, considerações ambientais e aspectos económicos. Relativamente aos parâmetros operacionais do sistema (trânsito de potência, perdas e níveis de tensão, entre outros), mesmo tratando-se de tecnologias de pequena potência, as unidades GD podem ser responsáveis por alterações significativas nos seus valores. É importante realçar que à medida que aumenta o número de unidades GD instaladas ao longo de uma rede, mais

significativas são as alterações nos valores dos seus parâmetros operacionais, o que requer maiores cuidados e que sejam equacionadas diferentes formas para aumentar a eficiência operacional das redes onde são inseridas (Willis, 2000).

A GD deve ser encarada como uma potencial solução para a resolução dos problemas relacionados, por um lado, com a dependência de combustíveis fósseis na produção de electricidade e escassez de algumas destas fontes de energia (de origem fóssil) a curto ou médio prazo; por outro lado, deve relacionar-se com as questões ambientais e de eficiência energética. Todas as entidades envolvidas no mercado da produção, transporte, distribuição e comercialização de energia devem conhecer claramente os benefícios decorrentes destas tecnologias. Sob a óptica das empresas produtoras de electricidade e concessionárias das redes, pode-se aliviar os sistemas de transporte e distribuição, reduzindo o trânsito de potência e as perdas, estabilizando os níveis de tensão, etc. No aspecto comercial, existe a expectativa da oferta de serviços auxiliares (controlo da potência reactiva, aumento da capacidade de reserva, balanceamento de fases, etc.) e a expansão dos negócios envolvendo compra e venda de energia eléctrica. Do ponto de vista do consumidor, há que ter em conta a perspectiva do uso racional da energia eléctrica produzida, aumento da qualidade e fiabilidade do serviço, desde que os sistemas de protecção e controlo estejam correctamente adaptados à produção de energia eléctrica com recurso a unidades GD. Para além deste aspecto há ainda a possibilidade de aumento da participação no mercado de energia eléctrica. Neste contexto, o crescimento da GD deve ser incentivado por acções conjuntas entre governo, concessionárias, investidores e sociedade em geral.

Tendo como base as considerações referidas e tendo em conta os objectivos de uma concessionária, investidor ou autoprodutor de energia em promover a introdução de unidades de GD com pequenas potências no sistema de distribuição, bem como as restrições orçamentais inerentes, surgem as seguintes questões pertinentes:

- Onde instalar as unidades de GD?
- Qual a potência das unidades de GD a instalar?
- Dependendo do tipo (renovável, não renovável) de unidade GD, saber qual a sua influência nas características operacionais das redes onde são instaladas.

As respostas a estas questões são muito importantes no contexto do ambiente competitivo do mercado de energia e oferecem às concessionárias uma alternativa

para a gestão racional dos recursos disponíveis para investimentos em melhorias no sistema. O processo de identificação dos melhores locais para instalação de unidades de GD ao longo de uma rede é extremamente complexo, devendo constituir um indicador de um conjunto de soluções possíveis de serem implementadas. Por outro lado, se empresas, investidores ou consumidores optarem por se tornar autoprodutores de energia, é do interesse tanto da concessionária como do produtor conhecer as melhores características operacionais das unidades de GD a serem instaladas, de modo a estas terem uma influência positiva sobre a operação do sistema.
A instalação de unidades GD mostra ser uma boa alternativa para fazer face ao aumento da procura em detrimento da produção centralizada, permitindo a redução das perdas.

1.1. Uma proposta para localizar e dimensionar unidades GD em redes de distribuição

A avaliação do desempenho de uma configuração do sistema de distribuição incluindo GD pode ser efectuada através da análise de diversos aspectos: técnicos, ambientais, financeiros, sociais, etc. Assim, foi desenvolvido um modelo de programação multi-objectivo incorporando explicitamente várias dimensões que contribuem para avaliar o mérito das soluções alternativas.

As soluções não-dominadas (óptimas de Pareto) para o modelo de programação multi-objetivo são calculadas através de uma abordagem baseada no *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA II) (Srinivas et al., 1994). Estas soluções correspondem a configurações de localização e dimensionamento de equipamentos (GD, baterias de condensadores (BCs) e disjuntores remotamente accionados (DRA). Com vista a dar conta da incerteza associada a variações não controláveis dos coeficientes do modelo em redor dos seus valores "nominais" foi aplicado um conceito de robustez associado às soluções, que consiste em agrupar estas soluções em categorias através de um grau de robustez, o qual é embebido no algoritmo genético (AG), contribuindo de forma directa para o cálculo do valor da função de aptidão associado às soluções (Barrico, 2007).

Neste trabalho pretende-se desenvolver uma metodologia para apoio à tomada de decisões na instalação de unidades de GD, BCs e DRA em sistemas de distribuição

radiais de média tensão. As funções objectivo consideradas no modelo são a minimização das perdas do sistema (determinando as potências activas e reactivas a serem injectadas nos nós da rede, através do dimensionamento das unidades GD e BCs) e o custo de investimento. Além disso, foi acrescentado um atributo a cada solução, que se destina a ajudar o agente de decisão (AD) na sua escolha da solução a adoptar. Sendo este atributo externo ao modelo e calculado para cada solução, resulta da indicação dos locais onde foram colocados os diversos equipamentos. Assim sendo, após a localização dos DRA[1] a rede passa a ser constituída por zonas e cada zona será constituída por todos os componentes físicos (nós, ramos, cargas, GD e BCs) existentes entre dois DRA consecutivos. Em caso de avaria num local qualquer da rede, as zonas a jusante do defeito podem continuar a ser alimentadas individualmente caso possuam GD e que a potência desta seja maior ou igual à potência solicitada pela menor carga existente nessa zona. Ou seja, essas zonas alimentadas pelas suas próprias unidades GD funcionam temporariamente de forma isolada, formando "ilhas". As avarias são simuladas com base na probabilidade média de avarias nos ramos das redes em estudo.

A opção pela utilização de redes radiais prende-se com as características desta topologia, comum nas redes de distribuição, que são: *a continuidade de serviço*, pois no caso de uma avaria num determinado ponto do sistema de distribuição, os consumidores ligados após este ponto terão o seu serviço de energia eléctrica indisponível até o problema ser resolvido; outro aspecto prende-se com o *aumento da carga*, pois à medida que aumenta a carga, maiores são as perdas e as quedas de tensão. Uma forma de colmatar estes problemas, sem que haja necessidade de reforço/reconfiguração da rede, passa exactamente pela correcta localização de unidades GD, BCs e DRA.

Dado que, na prática, os responsáveis pela distribuição estão limitados na sua capacidade de especificar pontos de ligação para a GD, esta proposta permite dar a conhecer um conjunto de soluções para melhorar o desempenho da rede. Permite saber onde (nó da rede) instalar que tipo de GD (renovável ou não renovável), de que potência e que benefícios pode trazer, permitindo certamente tomar as decisões mais adequadas em relação aos principais interesses da concessionária, sejam eles

[1] Dispositivo, com poder de corte, utilizado em redes activas com trânsito de potência bidireccional, que em caso de falha na alimentação proveniente da SE, pode ser remotamente accionado de modo a minimizar o impacto da falha na rede, criando ilhas a jusante do defeito.

técnicos ou económicos. No que se refere aos aspectos económicos, tal informação poderia ainda mudar a natureza ou parâmetros do contrato que poderia ser estabelecido entre a concessionária e o proprietário da unidade de GD.

1.2. Organização do trabalho

O trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma.

O Capítulo 2 introduz as questões essenciais associadas à GD num mercado em transformação, sendo ainda feita a identificação de potenciais barreiras que obstaculizam a penetração destas tecnologias no mercado.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a instalação de GD, sendo também identificados alguns métodos de cálculo do Trânsito de Potência referindo a escolha adoptada neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentadas as ferramentas computacionais necessárias para a análise proposta, abordam-se algumas questões relacionadas com a problemática da optimização multi-objectivo, e é feita uma revisão sobre as características fundamentais da implementação de AGs. São também identificados requisitos e instrumentos próprios deste tipo de algoritmos.

No capítulo 5 é apresentado um modelo multi-objectivo para apoio à tomada de decisões na instalação e dimensionamento de GD, BCs e DRA em redes de distribuição, descrevendo-se também a implementação prática de um AG aplicado ao problema em estudo. São, nomeadamente, referidas algumas inovações e alterações relativamente às propostas existentes, que contribuíram para o incremento da eficiência deste algoritmo, nesta aplicação em concreto.

No capítulo 6, depois da caracterização do problema em análise, procede-se ao estudo de dois casos (redes nacionais de 94 nós e 86 nós) de localização e dimensionamento de GD, BCs e DRA com recurso ao AG descrito no capítulo 5. É também focada a parametrização utilizada no AG e são analisados os resultados obtidos.

No capítulo 7 são apresentadas algumas conclusões e identificadas algumas linhas de acção com potencial para serem desenvolvidas no futuro.

2. A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NUM MERCADO EM TRANSFORMAÇÃO

O conceito de GD surge com o aparecimento da electricidade (corrente contínua), quando a indústria de electricidade era constituída por pequenas centrais eléctricas localizadas junto dos pontos de consumo, e nos casos em que tal não acontecia, como no caso da iluminação pública, as extensões das linhas eram limitadas. Alguns anos mais tarde, passou a ser sobretudo utilizada a corrente alternada em detrimento da corrente contínua e em vez de uma produção de energia localizada surgiu a produção centralizada. A corrente alternada tornou possível a transmissão de potência a longas distâncias, o que levou à produção de energia eléctrica em grande escala. Os benefícios da economia de escala, assim como da abrangência das grandes redes implementadas, fizeram com que os sistemas eléctricos de energia tenham sido desenvolvidos nos últimos 50 anos, seguindo a estrutura da Figura 2.1. Os grandes centros de produção de energia eléctrica encontram-se longe dos consumidores (produção centralizada) mas estrategicamente localizados (junto a portos marítimos ou fluviais, no caso das centrais térmicas). Estas centrais encontram-se ligadas a subestações que elevam os níveis de tensão para a ligação com a rede de transporte. O sistema de transmissão é usado para transportar a energia, muitas vezes através de grandes distâncias, a qual deriva em subestações para reduzir os níveis de tensão e, posteriormente, através de uma série de transformadores de distribuição, para ser distribuída aos consumidores residenciais, comerciais e industriais.

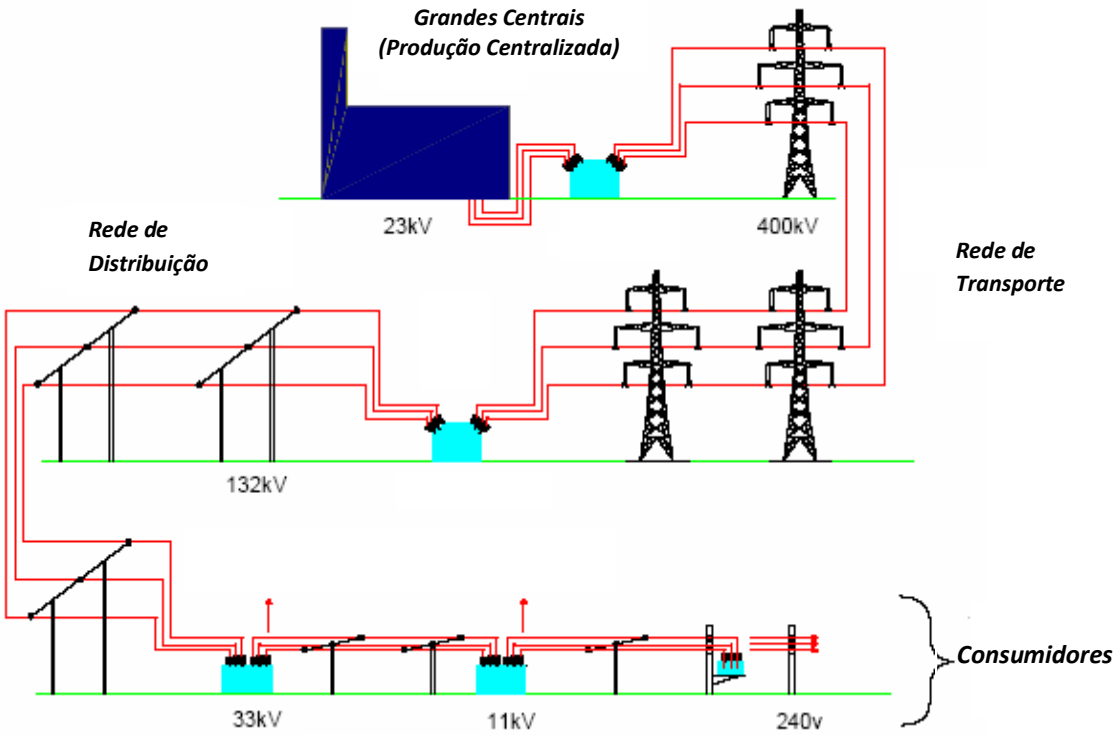

Figura 2.1 – Estrutura dos Sistemas de Potência Convencionais (Angelopoulos, 2004).

Na última década tem surgido um considerável interesse em ligar centros produtores directamente à rede de distribuição, designado geralmente por geração distribuída, embebida ou dispersa (figura 2.2). Este interesse está associado ao crescente aumento da procura de energia eléctrica, às necessidades de elevados padrões de qualidade e disponibilidade exigidos pelos consumidores, à eficiência (redução de perdas), às preocupações ambientais e sociais.

Actualmente, ainda não existe uma definição única do que constitui a GD e de como ela difere da geração convencional ou centralizada, fazendo com que surjam na literatura especializada diferentes interpretações (Daily, 2001). Geralmente, as definições de GD baseiam-se na potência da unidade geradora ou no nível de tensão ao qual o gerador é ligado. No entanto, intrinsecamente a estas definições estão normalmente associados aspectos técnicos usados para especificar a ligação ou operação da GD e não alguma consideração básica do seu impacto no sistema eléctrico de energia.

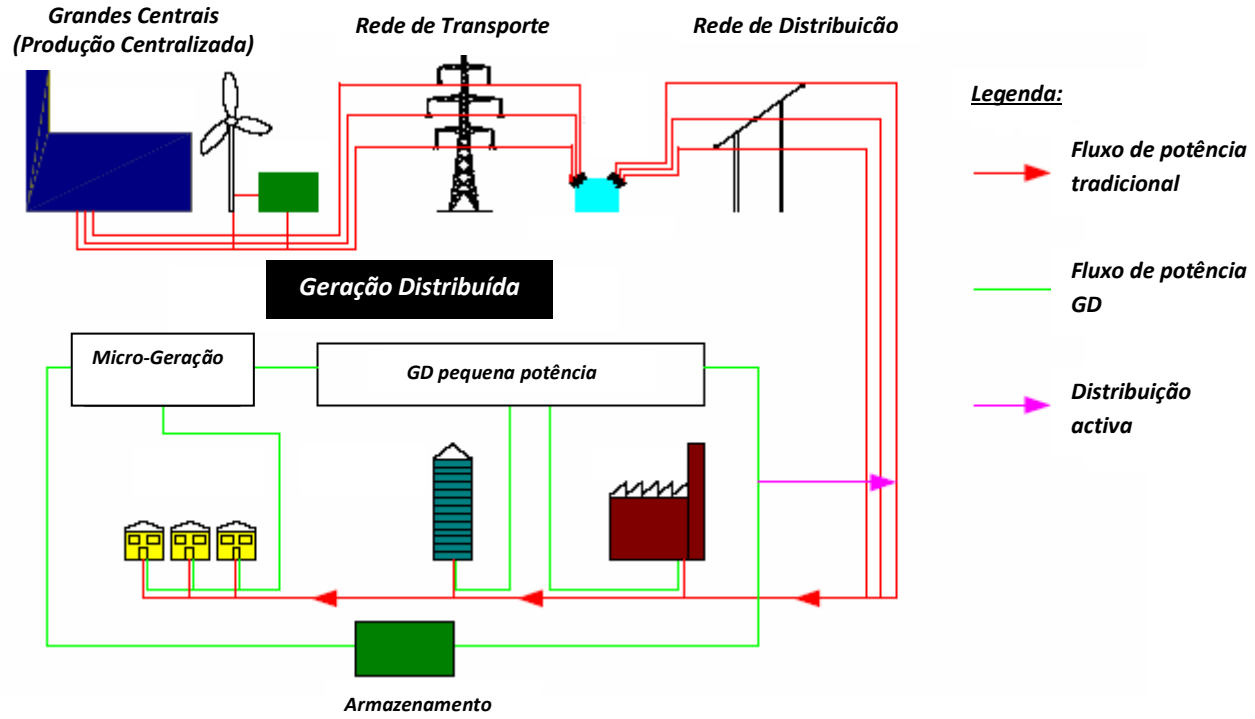

Figura 2.2 – Estrutura dos Sistemas de Potência com GD (Angelopoulos, 2004).

Nos EUA, a *California Energy Comission* define "GD ou (*Distributed Energy Resources*): tecnologias de produção de energia de pequena potência (tipicamente de potência compreendida entre 3 kW e 10 MW) localizadas junto dos pontos de consumo (uma residência ou uma empresa) como uma alternativa (funcionando como fonte de socorro) ou para incremento de potência face à alimentação centralizada" (CEC, 2006). O Departamento de Energia dos EUA considera que: "a GD se refere a uma variedade de tecnologias de produção de energia, caracterizadas por serem pequenas e modulares. Estas tecnologias, em ambos os lados, fornecimento e procura, podem estar localizadas perto dos pontos de consumo e as suas potências variam entre alguns kW e os 50 MW." (USDE, 2006). A EPRI (*Electrical Power Research Institute*) define muito sucintamente que: "a GD consiste em pequenas unidades de produção de energia (1 kW a 50 MW) e/ou dispositivos de armazenamento de energia tipicamente localizados junto das cargas (consumidores ou subestações de distribuição)" (EPRI, 2006). A WADE (*World Alliance for Decentralized Energy)*, define a GD como: toda a produção de energia despachada centralmente, junto do ponto de consumo independente da tecnologia, fonte primária, e se esta se encontra ou não ligada à rede (WADE, 2008).

O CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) apresentou, em 2004, uma definição mais abrangente, em que tem em conta critérios como a

localização, a capacidade de produção, a tecnologia, o impacto ambiental, o modo de operação e a penetração da GD, concluindo que a GD é a "produção de energia eléctrica confinada às redes de distribuição". Esta será a definição adoptada no presente trabalho.

No Brasil, para a ANEEL (Agência Nacional de Energia Eléctrica) os Procedimentos da Distribuição (PRODIST) definem a GD como "a produção de energia eléctrica, de qualquer potência, ligada directamente à rede de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despacháveis ou não pelo ONS (Operador Nacional do Sistema)" (ANEEL, 2006).

Em Portugal o termo utilizado para caracterizar a GD é o Produtor em Regime Especial (PRE) (ERSE, 2009). A produção em regime especial representa a actividade licenciada ao abrigo de regimes jurídicos especiais, no âmbito da adopção de políticas destinadas a incentivar a produção de electricidade, nomeadamente através da utilização de recursos endógenos renováveis ou de tecnologias de produção combinada de calor e electricidade. Com a publicação do Decreto-Lei 20/81, de 28 de Janeiro, passou a ser possível a venda à rede de excedentes de produção própria. É, no entanto, com a publicação do Decreto-Lei 189/88, de 27 de Maio, que é dado um forte impulso à produção independente, nomeadamente através da promoção da instalação de centrais de cogeração e mini-hídricas. No quadro legal vigente é considerada PRE a produção de energia eléctrica: com base em recursos hídricos para centrais até 10 MVA e nalguns casos até 30 MW; que utilize outras fontes de energia renovável; com base em resíduos (urbanos, industriais e agrícolas); em baixa tensão, com potência instalada limitada a 150 kW; por micro-produção, com potência instalada até 5,75 kW; através de um processo de cogeração.

Dependendo da fonte de energia, as várias tecnologias GD encontram-se divididas em duas categorias: renováveis e não-renováveis. As tecnologias renováveis incluem: solar, fotovoltaica ou térmica; eólica; biomassa; geotérmica; marémotriz. As tecnologias não-renováveis incluem: motores de combustão interna; ciclo combinado; turbina de combustão; microturbinas; células de combustível (dependendo da fonte primária, algumas destas podem ser incluídas no primeiro grupo).

No contexto da GD, as características das fontes primárias (renováveis ou não renováveis), o funcionamento de cada uma das tecnologias, os efeitos operacionais nas redes de distribuição e transporte, os benefícios sócio-ambientais, a viabilidade económica, os efeitos económicos no mercado eléctrico, a legislação correspondente, entre outros, são apenas alguns exemplos de tópicos susceptíveis de exploração. Como tal, neste capítulo é feita uma apresentação sucinta de alguns aspectos relacionados com a GD, referindo a natureza da sua motivação, as tecnologias existentes no mercado, o que pode suscitar a sua penetração no mercado (vantagens e inconvenientes) e a sua importância no futuro das redes eléctricas.

2.1. Motivação da Geração Distribuída

As principais motivações que induziram investimentos em GD, segundo pesquisa efectuada pelo CIRED (*Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution*) em 1997 e divulgada em CIRED (1999) foram: a redução de emissões de gases poluentes (fundamentalmente CO_2, SO_2 e NO_x); a eficiência energética e o uso racional da energia; a desverticalização e/ou políticas de competitividade (desregulamentação do sector); a diversificação das fontes energéticas; as necessidades energéticas de cada país. A este conjunto de motivações foram acrescentados pelo CIGRE WG 37-23 (CIRED, 1999): a modularidade das unidades GD; a facilidade de instalação; reduzidos tempos de construção/implantação de uma central GD e o menor capital investido; a possibilidade de serem localizadas junto dos pontos de consumo, reduzindo custos de transporte (perdas) e expansão das redes, dadas as valências atrás referidas (modularidade, dimensão, etc.).

As diferentes motivações mencionadas não apresentam o mesmo nível de interesse em todos os países. No entanto, hoje em dia, existe um aspecto comum, o impacto ambiental. Qualquer projecto que envolva a produção de energia eléctrica, quer este seja em grande ou pequena escala, deve ter presente como preocupação as emissões de gases de efeito estufa, emitidas pelas centrais que utilizam combustíveis fósseis. Como parte do Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1997), os países industrializados que o ratificaram deverão reduzir substancialmente as emissões de CO_2 para ajudar a conter as alterações climáticas. Perante este cenário, muitos países desenvolveram programas de incentivo às chamadas fontes alternativas ou renováveis, que incluem instalações eólicas, mini-hídricas (pequenas centrais

hidroeléctricas), fotovoltaicas, energia a partir de lixo municipal (biogás) e a partir da biomassa. Neste contexto as unidades GD têm um importante papel, dado que utilizam fontes primárias de energia renovável, são de menor dimensão e estão geralmente localizadas de forma geograficamente dispersa.

Além das tecnologias que usam fontes de energia renovável, algumas tecnologias consideradas como altamente eficientes e pouco poluentes, como, por exemplo, a co-geração *(Combined Heat and Power* - CHP), também têm recebido incentivos. Estas tecnologias, além de produzirem energia eléctrica, fazem uso do calor residual para processos industriais ou aquecimento de modo a incrementar a eficiência energética global. As tecnologias a destacar nesta área são: os motores de combustão interna, as turbinas de ciclo combinado; as turbinas de combustão, as microturbinas e as células combustível. Em geral, transportar o calor residual de baixa temperatura a longas distâncias não é económico, tornando necessário instalar uma central de co-geração perto da carga térmica. Estas unidades, em geral de pequena dimensão, geograficamente distribuídas e encontrando-se normalmente interligadas às redes de distribuição, operam mais em função das necessidades da carga térmica ou da carga eléctrica da instalação à qual se encontra ligada, do que propriamente às necessidades do sistema.

A GD é actualmente vista quase exclusivamente como produtora de energia. No entanto, apresenta outras mais-valias para a rede em que se encontra ligada, sendo de destacar, o controlo da tensão, a melhoria da fiabilidade da rede, o reforço da capacidade de reserva, etc. O desenvolvimento da GD está directamente relacionado com a estrutura da indústria do fornecimento de electricidade, bem como com o ambiente desregulamentado e de livre acesso à rede de distribuição.

2.1.1. Visão Europeia

Um marco de mudança na política energética europeia é notório a partir do momento em que as publicações efectuadas pela Comissão Europeia no *Green Paper* e no *White Paper* (COM, 1996) começaram oficialmente a integrar políticas energéticas envolvendo energias renováveis. O objectivo do *White Paper* em energias renováveis é assegurar que, até 2010, 12% da energia consumida na Europa seja fornecida através de fontes primárias renováveis. Neste contexto, para o caso específico da energia eólica, por exemplo, tal significaria uma capacidade instalada

de 40 GW em 2010 em toda a EU, conduzindo a um aumento da capacidade instalada em aproximadamente 31,5 GW a partir de 1996 (data destas publicações).

O objectivo principal destas publicações visava a apresentação de uma estratégia e plano de acção comunitários para promover as energias renováveis na UE. A publicação do *White Paper* definiu o ponto de partida, a partir do qual a Comissão Europeia estabeleceu uma série de iniciativas visando criar uma política Europeia para o incentivo e desenvolvimento destas fontes primárias. Em EC (2001), a Directiva 2001/77/EC fixou objectivos em relação à electricidade gerada no mercado interno através de fontes renováveis de energia, visando uma participação de 22% do consumo bruto de electricidade até 2010, valor depois rectificado para 21% devido à entrada de mais países na UE. Dados registados em EC (2008), indicam que, até 2006, esta participação ascendia a 15,3% na UE-15 e 14,6% na UE-27.

2.1.2. Visão Portuguesa

A GD em Portugal vem sendo prevista na legislação desde 1976, com a nacionalização de todas as empresas produtoras e distribuidoras de energia eléctrica, em que a EDP detinha o monopólio da produção e transporte de energia eléctrica. No entanto, o próprio documento que criou a EDP (Dec. Lei 502/76) previa a existência de pequenos produtores de energia eléctrica. No seguimento desta legislação, o Decreto-Lei 20/81, de 28 de Janeiro, veio estabelecer as medidas para incentivar a autoprodução de energia eléctrica restringindo, porém, a qualidade de autoprodutor às pessoas singulares e colectivas que acessoriamente a produzissem. Posteriormente, o Decreto-Lei 21/82, de 28 de Julho, regulamentou a figura do produtor independente de energia eléctrica e deu possibilidades às empresas privadas, públicas e cooperativas de poderem proceder à sua produção e distribuição segundo determinadas condições.

A publicação do Decreto-Lei 189/88, de 27 de Maio, abriu a actividade de produção independente às pessoas singulares ou colectivas, de direito público ou privado, independentemente da forma jurídica que assumam. Em Julho de 1995 foi publicada nova legislação que estabeleceu as bases de organização do Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e os princípios que enquadram o exercício das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica (Dec. Lei 182/95, de 27

de Julho). O SEN encontra-se organizado em dois sistemas com características distintas: o Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP), cujo objectivo é garantir o fornecimento de electricidade; o Sistema Eléctrico Independente (SEI), que não tem responsabilidade de serviço público, englobando situações particulares de produção de energia eléctrica para os quais existe legislação específica. É no SEI que estão incluídas as mini-hídricas (com potência até 10 MW), e outras formas de produção usando energias renováveis e cogeração. Existe ainda o subsistema, Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV) que se rege pela lógica de mercado.

Nos últimos anos, o sistema energético português tem sofrido profundas alterações, resultantes de medidas tomadas em várias áreas, sendo a mais relevante a que diz respeito à liberalização e desregulamentação do sector eléctrico.

De acordo com os princípios da Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa às regras comuns para o mercado interno da electricidade (Directiva 96/92/CE, de 19-12-96), foi publicado o Decreto-Lei 56/97, de 14 de Março que veio introduzir alterações pontuais que ajustam a lógica de funcionamento do sistema a um novo modelo de reprivatização do Grupo EDP.

O Decreto-Lei nº 313/95, de 24 de Novembro, regulamenta os limites de potência estabelecidos inicialmente. Para as instalações que utilizam recursos renováveis, combustíveis nacionais ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos, foram suprimidos os limites de potência instalada mantendo-se apenas limitação a 10 MW no caso dos aproveitamentos hidroeléctricos.

Legislação de 1999 (Decreto-Lei n.º168/99) introduziu alterações significativas no sistema de remuneração da energia fornecida pelos Produtores em Regime Especial que usam recursos renováveis (PRE-R). O sistema remuneratório passou a ser baseado num somatório de parcelas que contemplam, entre outros, os custos evitados pelo SEN com a entrada em funcionamento do PRE-R e os benefícios ambientais proporcionados pelo uso de tecnologias limpas.

Em 2001, com a publicação do Decreto-Lei n.º339-C/2001, o tarifário de venda de energia de origem renovável à rede pública foi actualizado, introduzindo uma remuneração diferenciada por tecnologia e regime de exploração. Esta

regulamentação manteve a obrigação de compra, por parte da rede pública, de toda a energia produzida pelos PRE-R.

Em 16 de Fevereiro de 2005 aquela legislação foi actualizada através da publicação do Decreto-Lei n.º 33-A/2005, nomeadamente no que se refere aos parâmetros de cálculo, tendo sido rectificada pela Declaração de Rectificação n.º 29/2005, de 15 de Abril, que alterou ligeiramente a fórmula de cálculo da remuneração mensal da energia entregue à rede pública.

Posteriormente, o Decreto-Lei n.º 225/2007, de 31 de Maio, veio rever os critérios de remuneração de electricidade produzida pelos PRE-R, designadamente: ao nível do biogás; a criação de uma tarifa específica para as centrais fotovoltaicas de microgeração; a reposição da tarifa prevista no Decreto-Lei n.º 339-C/2001 para a energia das ondas; a introdução do solar termoeléctrico; a valorização da biomassa florestal; a possibilidade de sobredimensionamento das centrais eólicas. Por fim, foi ainda criado o *Observatório das Energias Renováveis (ObsER)*, com o objectivo de acompanhar e monitorizar a instalação e o funcionamento dos centros electroprodutores que utilizem energias renováveis, bem como a utilização dos recursos primários.

No que diz respeito à política energética, o governo português aprovou, em 2005, a estratégia nacional para a energia, que definiu três objectivos em linha com a política europeia para a energia: garantir a segurança de abastecimento, estimular e favorecer a concorrência no sector, e alcançar uma adequação ambiental do processo energético.
Para a criação de um mercado liberalizado e concorrencial foi criado um quadro legal que incide sobre o alargamento da oferta, a dinamização do mercado e o acesso às redes e regulação independentes. Relativamente à liberalização dos mercados, as medidas adoptadas no mercado da electricidade permitiram o exercício do direito de escolha aos consumidores.
Com o objectivo de promover o desenvolvimento económico, reduzir a dependência energética externa, combater as alterações climáticas, fomentar a investigação e desenvolvimento em áreas de vanguarda tecnológica, e dar cumprimento aos compromissos estabelecidos a nível internacional, foram revistas em 2007 as metas

estabelecidas, em particular nas áreas das *energias renováveis* e da *eficiência energética*.

No domínio das *energias renováveis*, Portugal estabeleceu um dos objectivos mais ambiciosos da UE: a meta de produção de electricidade a partir de fontes de energia renováveis, passa de 39% para 45% do consumo bruto de electricidade em 2010, com uma aposta forte em energia eólica, energia hídrica, biomassa, biocombustíveis, biogás, energia solar fotovoltaica, micro-geração, energia solar térmica e energia das ondas.

A aposta na *eficiência energética*, quer do lado da oferta, quer da procura, é uma outra prioridade estratégica nacional com vista à redução dos impactes ambientais e da intensidade energética, prevendo-se uma redução de cerca de 10% no consumo de energia até 2015. Neste campo destacam-se o Plano Nacional de Acção para Eficiência Energética (PNAEE) (Gov, 2008), o Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de energia eléctrica (PPEC) (ERSE, 2009a), a publicação de nova legislação em matéria de eficiência energética nos novos edifícios, a aplicação do regulamento de gestão de consumos energéticos, a redução do consumo de energia pelo Estado através do plano de compras públicas ecológicas.

2.2. Cenário de Aplicação

Existe actualmente um mercado para a GD que é difícil de caracterizar e depende de uma série de aspectos para que se torne realidade. A questão é que esta forma de produção de energia eléctrica ainda não é competitiva na base do diagrama de cargas, associada aos contratos de longo prazo, nem no mercado a retalho. Para o sucesso deste tipo de produção de energia eléctrica, podem ser apontadas as seguintes condições:

- disponibilidade local de energia primária;
- dificuldades crescentes para o desenvolvimento de sistemas de transporte e distribuição (a GD pode ser um substituto parcial);
- estrutura tarifária que crie oportunidades para o uso de recursos distribuídos;
- avanços tecnológicos.

A GD pode potencialmente aumentar a fiabilidade e diminuir os custos do sistema, colocando unidades junto às cargas, além de aumentar a respectiva flexibilidade.

Apesar dos custos ainda elevados de algumas tecnologias, as opções de GD conseguem adequar-se às políticas energéticas voltadas para a utilização de novas fontes renováveis e à competitividade dos novos modelos de mercado, sendo notório o aumento da sua penetração no mercado nos anos mais recentes. De qualquer forma, a GD está directamente associada a condições específicas de aplicação, tais como: aspectos geográficos, disponibilidade de combustível ou recurso natural, natureza das actividades associadas a cada projecto, inserção no processo de reestruturação do sector energético, considerações ambientais, entre outras.

Do ponto de vista das concessionárias, estas poderão instalar GD que apresentem uma relação custo/benefício menor que a unidade, em alternativa a investimentos em redes de transporte e distribuição, desde que localizados e dimensionados adequadamente, de acordo com suas necessidades.

Em relação aos consumidores investidores, a escolha da implementação ou não de projectos de GD irá depender principalmente das considerações económicas. A GD, como os outros projectos de produção, engloba três elementos no seu custo: o custo fixo, o custo de operação e manutenção. Existem as seguintes possibilidades para diminuir o custo efectivo de projectos de GD:

- eficiência no uso da energia térmica (no caso da produção energia termoeléctrica): pela utilização da co-geração, pode-se produzir energia eléctrica e térmica, aumentando a eficiência do sistema;
- operação durante picos do diagrama de cargas;
- carga remota: indicada para locais onde o custo para expandir o sistema é maior que os custos de instalação da GD;
- subsídios do governo.

2.3. Vantagens e desvantagens da Geração Distribuída

A proximidade aos locais de consumo faz com que a GD tenha algumas vantagens, trazendo benefícios para os consumidores e ou para as empresas do sector sendo de destacar (Willis, 2000):

- *Redução das perdas do sistema:* ao deslocar-se a fonte de energia para próximo do consumidor haverá redução nas perdas dos sistemas de

transporte e distribuição, aliviando o congestionamento do sistema de transporte;

- *Diminuição dos riscos de planeamento*, devido à menor capacidade das unidades de produção e à flexibilidade das soluções;
- *Capacidade de fornecimento do sistema:* é essencial que a GD seja avaliada para operar durante os períodos de pico. O maior benefício que se consegue por esta vertente consiste em fornecer maior capacidade ao sistema em detrimento da expansão/reforço da rede. Como a GD tem um tempo de implementação menor, comparativamente à geração centralizada e aos reforços das respectivas redes, permite uma resposta mais rápida ao crescimento da procura;
- *Redução dos investimentos:* ao instalar novas centrais, nomeadamente para satisfazer a ponta e para reservas do sistema de produção, dado que a GD pode ser instalada de forma modular à medida que aumenta a procura. O recurso a políticas de gestão adequadas permite efectuar poupanças nas facturas energéticas, com a produção de energia durante os picos de consumo e/ou nas horas de ponta, tornando mais rápida a amortização dos investimentos,
- *Aumento da segurança do sistema de distribuição e qualidade de serviço.* A existência de reserva (de geração) distribuída permite um aumento da segurança de abastecimento do sistema eléctrico. Por outro lado, verifica-se um aumento da qualidade de serviço aos consumidores próximos dos pontos de produção por adicionar fonte não sujeita a falhas no transporte e distribuição. A garantia da continuidade de serviço é um factor crítico para alguns sectores industriais e empresas de serviços da nova economia, sobretudo onde a interrupção de serviço é economicamente inaceitável, ou em sistemas onde possam colocar em risco quer a segurança humana, quer a área envolvente (edificio, equipamentos...);
- *Disponibilização de energia eléctrica em áreas sensíveis*, do ponto de vista ambiental e histórico, com recurso a técnicas que permitem uma elevada eficiência e reduzida emissão de poluentes. A diminuição dos impactos ambientais da produção de energia eléctrica resulta da utilização de combustíveis menos poluentes, do melhor uso dos combustíveis tradicionais e permite, com a utilização da co-geração, a eliminação de resíduos industriais;

- M*aiores oportunidades de comercialização*, na medida em que locais que eram remotos e não tinham viabilidade de disporem de energia eléctrica, poderão passar a ser alimentados, melhorando as condições locais da actividade económica dessas zonas. Para a competitividade no mercado de energia eléctrica surgem também mais oportunidades, permitindo o aparecimento de um maior leque de prestadores de serviço.

A GD possui, contudo, as seguintes desvantagens que devem ser tidas em consideração:

- O planeamento e a operação do sistema eléctrico ficam mais complexos;
- Há um aumento da complexidade administrativa, comercial e contratual.
- Há um aumento da complexidade nos procedimentos, na realização de acções de manutenção e nas medidas de segurança a serem tomadas;
- Por vezes, existe uma diminuição do factor de utilização das instalações das concessionárias de transporte e distribuição, bem como de centrais produtoras, o que vai fazer com que exista uma tendência para aumentar o preço médio de fornecimento;
- As entidades responsáveis pelas redes de transporte e distribuição necessitam de se equipar com ferramentas de análise para avaliação do impacto das fontes de GD, ligadas à rede, quer sob o ponto de vista de fiabilidade de fornecimento, quer de estabilidade de operação e qualidade de tensão.

Associadas a estas e outras questões estão custos que se dividem em:

- *Custos para o sistema devido à interligação e operação da GD*;
- *Custos associados a instalações individuais* (que funcionam de forma isolada).

Estes custos variam com a localização, a capacidade, o tipo de GD e o sistema de distribuição ao qual a GD será ligada, podendo compreender:

- Custos de redimensionamento/projecto do sistema: identificação dos requisitos, modificações e restrições impostas ao sistema pela GD;
- Custos de teste, operação e manutenção do sistema;
- Custo da interligação da GD com a rede.

No que diz respeito aos custos de aquisição e de operação de certas tecnologias de GD, estes têm registado uma diminuição significativa nos últimos anos e espera-se que esta tendência continue. No caso particular dos sistemas fotovoltaicos, os custos de cada kWh fornecido têm diminuído em cerca de 70% desde a década de 80, estando previsto que estes custos caiam cerca de 70% desde hoje até 2020. Na Tabela 2.1 podemos observar os custos de operação e manutenção e custos de investimento referentes a algumas tecnologias GD.

Apesar dos custos directos da GD terem decaído, também os custos da energia fornecida pela rede distribuidora têm registado uma diminuição. Mas esta última prende-se com outras questões, nomeadamente com a competição imposta pelos mercados desregulamentados e com a opção por parte da concessionária da rede em instalar tecnologias de produção de energia geralmente de grande potência, mas de elevada eficiência.

Tecnologia	Custo de Unidade (€/kW)	Custo de O&M (€/kWh)
Motor de Combustão Interna (Gás) (Wartsila Portugal, Lda.)	300 – 900	0,007 - 0,015
Turbina a Gás – Ciclo combinado (ALSTOM Power Generation Aktiengesellschaft)	300-1000	0,004 - 0,01
Micrturbina (Turbec R&D AB)	700-1100	0,005-0,016
Célula de Combustível (SMART ELECTRONIC DEVELOPMENT GmbH)	2800-4700	0,005-0,01
Turbina Eólica (Vestas Portugal)	1000-1200	1,5% a 2% do investimento inicial por ano
Biomassa (Evonik Industries AG)	800-2200	0,07
Biogás (KW Energie Technik e.K.)	1200 - 4000	0,04
Mini-hídrica (ABB)	1200-3000	1,5% do investimento inicial por ano
Fotovoltaica (FFSolar, Lda)	4000-5000	1% do investimento inicial por ano

Tabela 2.1 – Custos por kW instalado de algumas tecnologias GD (consulta realizada directamente às empresas acima mencionadas).

2.4. O futuro da GD

A necessidade de energia encontra limites ambientais e sociais. Observa-se que é crescente o interesse por fontes de energia renováveis e seguras. Todos os países da Europa, de acordo com a directiva 2009/28/EC, têm agora como meta incrementar a componente de energia renovável nos seus sistemas em 20% até 2020 (Figura

2.3), o que significa que cerca de 34% da energia eléctrica produzida será proveniente de fontes de energia renovável.

No entanto, a instalação das unidades de GD no sistema eléctrico necessita, além do estudo de impacto técnico, de coordenação. A investigação levada a cabo tem demonstrado que as várias vantagens da inclusão da GD como forma de produção de energia limpa e sustentável é vantajosa e economicamente favorável. No entanto, é necessária a monitorização destas unidades no sistema (Bayegan, 2001).

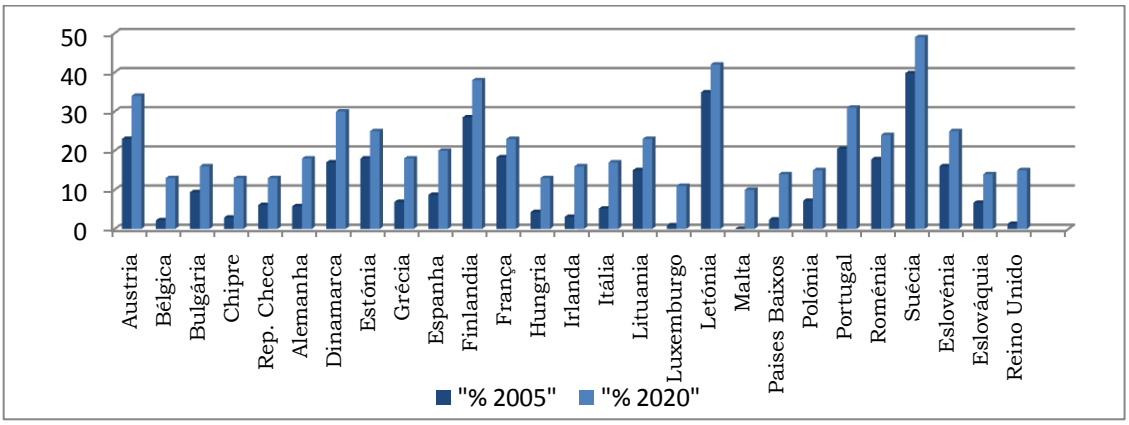

Figura 2.3 - Percentagem de energia renovável no consumo global da UE em 2005 vs alvos para 2020.
Fonte: http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects (consultado Junho de 2009).

A instalação de uma unidade geradora pode, dependendo do nível de carga, aumentar as perdas do sistema, bem como elevar os níveis de tensão a patamares fora dos permitidos. Podem ocorrer outros problemas em caso de curto-circuito no sistema, que torna necessária a retirada imediata da unidade de funcionamento. Tais problemas de coordenação apenas poderão ser resolvidos quando as unidades forem geridas como "*Virtual Power Plants*" (VPP) de controlo centralizado ou descentralizado.

Um centro de controlo com servidores ligados a uma rede de comunicação dedicada seria uma possibilidade para se resolver esses problemas. Devido ao nível de desenvolvimento do serviço e à sua crescente popularidade, a Internet é vista hoje como uma possível solução para o controle da GD (Bayegan, 2001). Esses servidores controlariam, via software, a entrada e saída da energia que advém da GD, de acordo com o perfil de carga analisado e a disponibilidade das fontes em cada instante. Neste sentido, determinariam também a quantidade de energia

(tanto activa como reactiva) que cada unidade forneceria ao sistema de forma que este apresente um desempenho máximo.

A forma de aproveitar a energia eléctrica produzida pelas tecnologias GD será a responsável pela migração de uma arquitectura tradicional centralizada para uma arquitectura descentralizada, ou seja, interligar estas unidades de produção de energia eléctrica com as redes já existentes.

Este sistema possui as seguintes vantagens (já referidas e subjacentes às tecnologias GD):

- Diminuição de custos e perdas associadas ao transporte;
- Possível melhoria da qualidade de serviço;
- Aumento da fiabilidade do sistema de distribuição;
- Diminuição das emissões de CO_2 provocadas pelas grandes centrais eléctricas, pois estas diminuem a sua produção.
- Menor vulnerabilidade face a "blackouts" e ataques terroristas, permitindo cargas confinadas a determinadas áreas geográficas ("ilhas").

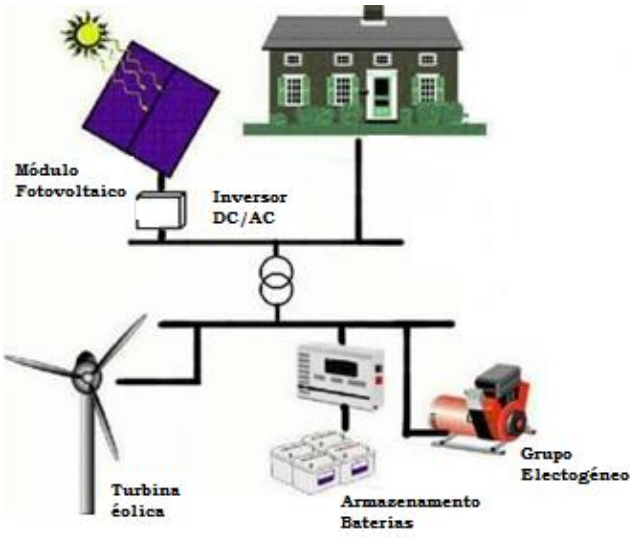

Figura 2.4 – Esquema de uma VPP.

Para além das vantagens referidas, as VPP possuem a desvantagem de "descontrolar" o sistema de distribuição, visto que numa arquitectura centralizada o centro de despacho sabe quais as cargas a alimentar, enquanto numa arquitectura descentralizada se torna mais complexa a conjugação da produção de cada unidade para satisfazer as mesmas cargas, dado que algumas unidades GD não são

despacháveis (eólica, solar,...). Verifica-se então a necessidade de implementar um sistema que controle toda a produção, sendo este considerado um ponto fraco das VPP pois, caso existam falhas, estas podem provocar um corte de energia em todo o sistema. É neste contexto que o desenvolvimento das tecnologias de comunicação e de informação desempenha um papel extremamente importante para gerir todo o sistema. Na gestão do sistema podem-se empregar dois tipos de controlo (Jiménez, 2006):

- *Controlo Descentralizado*

  Para este tipo de controlo, cada unidade GD é controlada localmente, tornando-se assim necessário que cada unidade tenha informação sobre as restantes unidades. Este sistema de controlo permite a cada unidade tomar decisões mediante as necessidades da rede (figura 2.5).

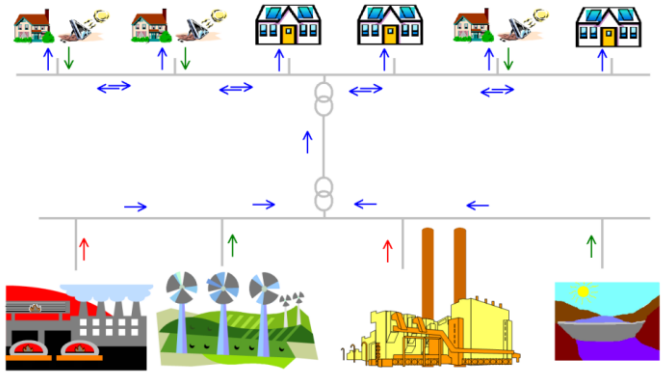

Figura 2.5 - Controlo descentralizado (Jiménez, 2006).

- *Controlo Centralizado*

  Neste tipo de controlo existe apenas uma central de controlo, a qual tem como função monitorizar e actuar de vários modos as unidades de GD (figura 2.6).

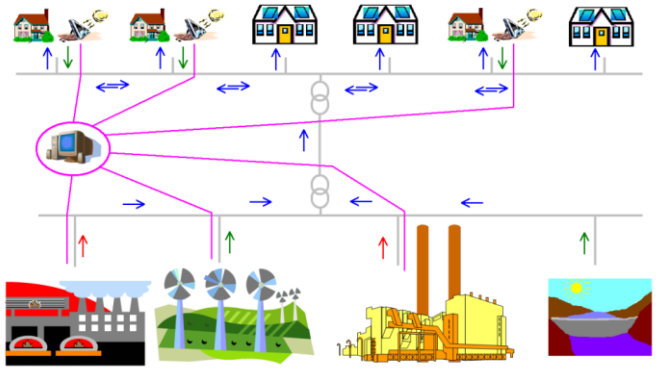

Figura 2.6 - Controlo centralizado (Jiménez, 2006).

As VPP têm ainda a desvantagem de alterar o sistema de trânsito de potências nas linhas de transporte e distribuição de energia eléctrica, dado que ao quebrar o sistema tradicional centralizado, há inversões do fluxo de potências. Como as linhas já existentes foram, em geral, projectadas para o trânsito de potência apenas num sentido, leva a que todo o funcionamento dos sistemas de protecção (coordenação, selectividade, etc) tenha de ser revisto. Assim, neste paradigma as redes deixam de ser passivas, servindo apenas para o transporte de energia, para serem activas, transportando energia e informação sobre o seu estado em cada instante. Isto é, as redes poderão passar a operar como uma World Wide Web integrando dados e energia, também denominada de *Smart Grid* ou Redes Inteligentes.

2.5. Conclusão

Com base na informação acima exposta, e considerando a actual conjuntura económica de aversão a riscos, onde as instituições financeiras não pretendem investir grandes quantidades de capital sem ter a certeza de retorno a curto prazo, a tendência de crescimento da GD é, sem dúvida, uma realidade para os próximos anos que irá agir directamente sobre os mercados de energia eléctrica em todo o mundo. Surgem, assim, necessidades e oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em relação a diversos problemas: qualidade da energia*;* coordenação de potência; segurança das margens de reserva girante e fiabilidade das redes de distribuição; protecção; manutenção; políticas de despacho; políticas regulatórias e tecnologias de informação e comunicação, entre outros.

Uma solução para a dependência energética poderá passar pela aposta em sistemas fundamentalmente baseados em energias renováveis com uma arquitectura VPP descentralizada, aumentando assim a eficiência energética global.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica destinada a contextualizar as contribuições desta tese. Neste contexto não será feita directamente referência a métodos clássicos de optimização. Em geral, os métodos de programação matemática não podem garantir uma solução óptima para os problemas em sistemas de distribuição de dimensões reais tendo em conta todos os factores que influenciam a escolha da solução óptima. Dada a dimensão e a natureza combinatória dos problemas de localização e dimensionamento de unidades GD na rede, os trabalhos apresentados usam algoritmos de optimização, heurísticas e meta-heurísticas, considerando modelos com um única e com múltiplas funções objectivo, para diversos problemas envolvendo o apoio à tomada de decisões sobre GD.

De modo a simplificar a análise, faz-se a classificação dos algoritmos de acordo com a abordagem proposta, referindo-se as características principais de cada método de resolução do problema, sendo os trabalhos apresentados dentro de cada grupo por ordem cronológica. No final deste capítulo é feita, ainda, uma breve referência aos métodos de trânsito de potência utilizados nas abordagens metodológicas.

3.1. Algoritmos Genéticos

Os AGs, segundo Goldberg (1989), são métodos computacionais de pesquisa baseados na genética e nos mecanismos de evolução natural. Uma população de possíveis soluções de um problema evolui de acordo com operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas, de modo a que há uma tendência de que, em média, os indivíduos representem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

Em Leão e Matos (1997) é apresentado um modelo multi-objectivo de programação inteira mista para localização de unidades de GD no sistema de distribuição utilizando conjuntos fuzzy e AG. Este trabalho possui como funções objectivo a minimização das perdas, a minimização dos custos, a maximização da fiabilidade e uma última que maximiza a robustez das soluções, considerando restrições de ordem técnica e económica.

Em Kim et al. (1998) descreve-se um modelo mono-objectivo linear inteiro visando a minimização das perdas, tendo em conta restrições de ordem técnica relativas ao fluxo de potência, usando um AG.

Em Carpinelli et al. (2001) é apresentado um modelo mono-objectivo baseado em AG e teoria da decisão para o dimensionamento e localização óptimos de turbinas eólicas de 200 kW numa rede de média tensão. A função objectivo a minimizar diz respeito aos custos e as restrições de ordem técnica referem-se à injecção de potência na rede primária e ainda a factores como a capacidade dos alimentadores, alterações no perfil de tensão e correntes de curto-circuito em todos os nós.

Celli e Pilo (2001) propõem a utilização de AG para a localização óptima das unidades de GD na rede de distribuição, sendo o modelo utilizado mono-objectivo onde se pretende minimizar custos, tendo em conta restrições técnicas.

Em Carpinelli et al.(2002) é apresentado um modelo mono-objectivo não linear para a escolha do local e potência óptima da unidade GD (sendo aqui apenas considerada a energia eólica) a instalar com vista a minimizar a função custo total da rede (instalação, O&M, perdas, etc.), tendo em conta restrições de ordem técnica e de custos. Esta metodologia é composta por três passos: criação de um conjunto de cenários (diferentes produções eólicas e probabilidades associadas), para cada cenário são aplicados AG com vista à escolha de uma solução óptima, usando técnicas de teoria da decisão é escolhido o melhor local e potência eólica a instalar. A incerteza associada aos coeficientes da função objectivo é tratada através de procedimentos baseados no método de *Monte Carlo* para estimativa da média e da variância dos custos de produção.

Celli et al. (2003) desenvolveram um modelo multi-objectivo não linear para localização e dimensionamento de GD em redes de distribuição, cujas funções objectivo são o custo de reforço das redes, o custo das perdas, o custo da energia não fornecida e um índice de desempenho, onde categoriza a qualidade da onda da tensão através da poluição harmónica. As restrições são de ordem técnica (limites de tensão, valores máximos das correntes nas linhas, etc). As soluções são obtidas

com o recurso a AG integrando técnicas de tratamento das restrições. As incertezas associadas às cargas e às tecnologias de GD são tidas em conta por meio de funções de densidade de probabilidade.

Em Celli et al. (2005) é apresentado um modelo multi-objectivo usando um AG para localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição. As funções objectivo consideradas para minimização são os custos de expansão da rede, custos das perdas, custos da energia não fornecida (custos da interrupção de serviço), o índice de desempenho associado ao nível de distorção harmónica e os custos da energia comprada à rede e a sua revenda aos consumidores.

Em Haensen et al. (2005) é apresentada uma metodologia mono-objectivo para localizar e dimensionar unidades GD (painéis fotovoltaicos e CHP) numa rede de média tensão e de topologia radial de vinte nós. Esta metodologia assenta na minimização das perdas da rede no período de 24 horas, considerando vários cenários de carga (Reduzido, Médio e Elevado) no Verão e no Inverno. No processo de cálculo é utilizado o valor médio dos picos diários registados nos diagramas de carga para cada cenário. A função objectivo é linear e as restrições são de ordem técnica, correntes e tensões nas linhas e nós. Utiliza um AG para a obter a solução óptima, em que a medida de desempenho (fitness) resulta do cálculo do valor da função objectivo acrescida de penalizações caso a tensão exceda os limites impostos e o número de unidades seja superior a dez.

Santos, Antunes e Martins (2006) apresentam uma metodologia multi-objectivo para localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição, cuja estruturação inicial do problema é realizada através de uma "soft system methodology". As funções objectivo são a minimização das perdas e a minimização dos custos de instalação e as restrições são de ordem técnica e económica. É utilizado um AG elitista para caracterizar um conjunto de soluções na frente óptima de Pareto.

Em Borges e Falcão (2006) é apresentada uma metodologia de localização e dimensionamento de GD em redes de distribuição, visando a minimização de perdas na rede, garantindo também níveis aceitáveis de fiabilidade e de tensão nos nós da rede. O processo de optimização consiste numa combinação entre AG e métodos analíticos para a avaliação do impacto da GD na fiabilidade, e métodos de trânsito de potência para a avaliação das perdas e níveis de tensão da rede. A função para a avaliação da robustez das soluções apontadas pelo AG relaciona o benefício obtido devido à instalação de GD e o investimento resultante da sua

instalação e custos de operação. Por outro lado, a avaliação das perdas e dos níveis de tensão é resultante de métodos de trânsito de potência utilizados em redes radiais. A avaliação dos índices de continuidade é realizada com base em métodos analíticos, de modo a poderem ser utilizados em ambiente de gerações múltiplas. A optimização pode ser realizada de duas formas distintas, automaticamente ou manualmente. Na forma manual não é utilizado o AG, sendo a localização realizada pelo agente de decisão utilizando os diversos métodos de avaliação acima descritos. Por sua vez, a forma automática é caracterizada pela substituição do agente de decisão pelo AG.

Harrison e Piccolo (2007) desenvolveram uma metodologia que combina o trânsito de potência com a capacidade que os AGs possuem para trabalhar com populações de soluções. Este método requer que seja definido o número de unidades GD a serem instaladas e restrições em termos de localização ou na capacidade das unidades GD. O AG gera um conjunto de localizações de GD na rede. Para cada combinação é calculado o trânsito de potência de modo a definir a capacidade disponível para a referida combinação. A função objectivo definida é uma função linear simples, que pretende minimizar os custos decorrentes da instalação de GD na rede, dentro dos limites impostos pelas restrições (queda de tensão e limite térmico das linhas).

Em Singh et al. (2007) é apresentado um modelo mono-objectivo para localizar e dimensionar unidades GD, em que a função objectivo a minimizar diz respeito às perdas e as restrições são de ordem técnica, sendo as soluções obtidas com recurso a um AG.

Sedighizadeh e Rezazadeh (2008) apresentam um modelo mono-objectivo para a localização de unidades GD em redes de distribuição, visando a minimização das perdas melhorando o intervalo de variação dos níveis de tensão. As restrições são de ordem técnica, limites dos níveis de tensão nos barramentos e valor máximo das perdas. O modelo utiliza um número fixo de unidades GD, duas unidades de 1600 kW e 0,01 kVAr, recorrendo a um AG para a obtenção das soluções.

Pisica e Eremia (2009) desenvolveram um modelo multi-objectivo de optimização não linear e um modelo multi-objectivo de optimização utilizando um AG para localizar e dimensionar unidades GD em redes de distribuição, realizando a comparação entre ambos os modelos. As funções objectivo a minimizar são as perdas e os custos de investimento, considerando restrições de ordem técnica. A metodologia que desenvolveram para estabelecer a comparação entre os resultados

de ambos os modelos pretendia analisar o momento em que um dos modelos (não linear e usando AG) deixava de ser tratável num tempo computacional aceitável. Isto é, iniciaram a comparação com a instalação de uma unidade GD seguidamente aumentavam o número de unidades GD até que um dos modelos falhasse. Tendo sido constatado que à medida que a complexidade ia aumentando (maior número de variáveis), o modelo com o AG continuava a produzir bons resultados (soluções) enquanto que o modelo não linear não conseguia produzir soluções.

Singh e Goswami (2009) desenvolveram um modelo mono-objectivo para localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição. A função objectivo a minimizar é a taxa a cobrar ao trânsito de potência activa em cada nó da rede. Os nós da rede com maior taxa são potenciais locais de instalação de unidades GD, fazendo com que essa taxa seja reduzida nesse nó não obstante a que noutros nós o seu valor aumente. De modo a contornar esta situação, foi considerada como função objectivo a minimizar o valor médio, por unidade, das taxas a aplicar ao trânsito de potência activa. As restrições são de ordem técnica e limites de tensão nos nós, sendo as soluções obtidas com recurso a um AG. Esta metodologia pode ser utilizada para a localização e dimensionamento de apenas uma unidade GD ou múltiplas unidades. Este modelo demonstrou que a localização das unidades GD está condicionada a nós praticamente pré-definidos, enquanto que o seu dimensionamento está dependente do tipo de carga existente em cada nó.

3.2. Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é uma meta-heurística que pertence à classe dos algoritmos de pesquisa local, que se pode aplicar a problemas de optimização combinatória baseado na metáfora de arrefecimento e cristalização de estruturas (em geral, aplica-se a problemas discretos, mas também se pode aplicar a problemas contínuos). Este procedimento permite encontrar soluções próximas da óptima sem grande esforço computacional, sendo um processo fiável para usar em situações em que o conhecimento é escasso ou que aparenta difícil aplicação algorítmica.

Os trabalhos a salientar que utilizam esta técnica são seguidamente referidos.

Em Leão e Matos (1999) é apresentado um modelo multi-objectivo linear inteiro misto para a localização e dimensionamento da GD em redes de distribuição. As funções objectivo são o custo de investimento, o custo de operação e os custos da energia não fornecida. As restrições são de ordem técnica e económica. São usados

"*fuzzy sets*" para modelar a incerteza associada às tecnologias baseadas em energias renováveis. As soluções são obtidas usando a meta-heurística *Simulated Annealing* modificada. O modelo inclui um índice de robustez de modo a expressar o modo de adequação de cada solução à previsão de crescimento da procura.
Gandomkar et al. (2006) propõem um modelo multi-objectivo para localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição baseado no *Simulated Annealing,* cujas funções objectivo a minimizar são os custos das perdas, custos de operação das unidades GD e os custos de instalação (de alimentadores, subestações e GD). As restrições são de ordem técnica (número máximo de unidades GD, potência máxima de GD a instalar, limites de tensão, entre outras).

3.3. Tabu Search

O *Tabu Search* é uma variante da pesquisa local no qual, para evitar que o processo fique "preso" em óptimos locais durante o processo de pesquisa, há um conjunto de movimentos que são proibidos (tabu).
Utilizando esta técnica são de referir duas contribuições.
Em Domínguez et al. (2006) é apresentado um algoritmo baseado no *Tabu Search* para localização de pequenas unidades GD de modo a melhorar os parâmetros operacionais de redes de distribuição com mau desempenho. O modelo matemático não linear consiste na minimização da função objectivo que representa os custos de produção de energia, sendo atribuídos a estes custos penalizações devido ao congestionamento nas linhas assim como a sobretensões e subtensões nos nós da rede. As restrições são de ordem técnica e dividem-se em restrições de operação e restrições das variáveis de controlo. Nas primeiras restrições são consideradas as capacidades de trânsito de potência das linhas e transformadores e os limites de tensão nos nós. As restrições das variáveis de controlo são utilizadas para determinar os valores que as variáveis podem assumir de modo a delimitar o espaço de pesquisa.
Em Navarro et al. (2007) é apresentada uma aplicação desenvolvida em Matlab para optimização da localização de GD em redes de distribuição. Este modelo baseado no *Tabu Search* surge como uma adaptação do problema do caixeiro-viajante para o problema de localização de GD na rede de distribuição. No caso da localização das unidades GD na rede de distribuição a função objectivo a minimizar é o custo das

perdas, tendo em conta uma injecção de potência mínima em cada nó da rede, considerando restrições de ordem técnica.

3.4. Abordagens Híbridas

Algumas abordagens, designadas de abordagens híbridas, são caracterizadas por utilizarem mais do que uma meta-heurística na sua implementação, de modo a fazerem uso conjunto das suas potencialidades.

Kim et al. (2002) propõem o dimensionamento e localização óptimo das unidades de GD em redes de distribuição utilizando o AHP, que permite quantificar critérios qualitativos. A formulação do problema considera como função objectivo a redução dos custos das perdas e como restrições o número ou potência das unidades GD e o valor da tensão nos barramentos. A ideia consiste em resolver um problema não linear "fuzzy", sem que seja necessária a transformação deste num modelo linear. A função objectivo original (custos) e as restrições são transformadas em múltiplas funções equivalentes com recurso a números "fuzzy", de modo a avaliar a sua natureza imprecisa e, depois, resolver o problema usando o AG proposto.

A metodologia proposta por Gandomkar (2005) visa a localização de GD em redes de distribuição usando AG e *Simulated Annealing*. A metodologia desenvolvida optimiza a localização e o dimensionamento dos GD, tendo em conta um número fixo de tecnologias GD e uma capacidade total de GD pré-definidas. A função objectivo consiste na minimização total das perdas da rede. Os autores deste trabalho pretendem, com a combinação de um funcionamento híbrido entre AG e *Simulated Annealing*, apresentar melhores resultados do que aqueles resultantes da actuação simples de AG, conseguindo melhores tempos computacionais em termos de convergência para soluções óptimas.

Em Gandomkar (2005a) é apresentada uma optimização híbrida que usa AG e *Tabu Search* para localizar GD em redes de distribuição. Trata-se de um modelo mono-objectivo cuja função objectivo a minimizar se refere às perdas, onde estão incluídas as perdas harmónicas. Como restrições são considerados os limites de tensão nos nós da rede e o número máximo de unidades/potência GD a instalar na rede. No processo de optimização, o AG é usado para localização óptima da GD, e o *Tabu Search* funciona como uma ferramenta para evitar óptimos locais e convergências prematuras do AG. As perdas equacionadas neste trabalho não são apenas as que resultam das impedâncias das linhas, incluindo também as perdas

devidas aos harmónicos. Estas perdas são calculadas assumindo o pior cenário, THD=5%. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização da implementação híbrida em detrimento do AG simples.

3.5. Outros métodos

Na literatura científica relativa ao planeamento da expansão da produção num ambiente competitivo são também reportados modelos baseados na teoria dos jogos, por Chuang e Wu (2001). Para além de cenários e "*fuzzy sets*", a incerteza associada às fontes de energia primária e às cargas é também caracterizada através modelos estocásticos, por Ang e Huang (1999).

Harrison e Wallace (2005) apresentam uma metodologia mono-objectivo que diverge das técnicas comuns pois em vez de utilizar o Fluxo de Potência Óptimo na optimização das pontas dos diagramas de carga, procura condições de colapso dos valores da tensão. As restrições dizem respeito à violação dos valores das quedas de tensão e limites térmicos das linhas. Cada unidade GD é representada como uma carga negativa e o limiar térmico das linhas expresso como um problema de adição de cargas. Isto é, trata-se de um problema de optimização das pontas do diagrama de cargas usando cargas negativas, onde os custos destas são minimizados ("*reverse load-ability*").

Krueasuk e Ongsakul (2006) desenvolveram um modelo mono-objectivo para o dimensionamento e localização de unidades GD em redes de distribuição utilizando como ferramenta de optimização a *Particle Swarm Optimization*. A função objectivo a minimizar considerada é referente às perdas do sistema. As restrições são de ordem técnica referentes ao trânsito de potência, limites de tensão nos nós e corrente nos ramos. O modelo utiliza três tipos de unidades GD, as que produzem apenas potência activa, as que produzem apenas potência reactiva e as unidades que produzem potência activa e consomem potência reactiva.

Em Falaghi e Haghifam (2007) é proposto um modelo para dimensionamento e localização de unidades GD em redes de distribuição utilizando a *Ant Colony Optimization* como ferramenta de optimização. O problema não linear, com variáveis inteiras (devido à capacidade discreta das unidades GD), minimiza a função objectivo custo, onde estão presentes os custos de investimento em GD, custos de operação e manutenção da unidades GD, custos da energia comprada à rede de distribuição e custo das perdas do sistema. As restrições são de ordem técnica,

onde se destacam a capacidade máxima de transporte das linhas, os limites da amplitude da tensão e a potência máxima das unidades GD a instalar em cada nó.
Em Anantasate et al. (2008) é apresentada uma metodologia baseada na ferramenta de optimização designada de *Bee Colony Optimization* para determinar o número óptimo de unidades GD a instalar numa dada rede de distribuição, bem com o seu dimensionamento e localização. Trata-se de um modelo multi-objectivo que pretende minimizar simultaneamente as perdas activas e as violações referentes à função de análise de contingência. As restrições apresentadas são de ordem técnica e limites de potência total referente às unidades GD a instalar na rede. Este modelo foi ainda alvo de comparação, em termos de tempos de processamento computacional, com outros modelos como o *Tabu Search, Simulated Annealing* e AG. Desta comparação, este modelo apresentou tempos de processamento mais reduzidos para os resultados obtidos.

3.6. Trânsitos de Potência em Redes de Distribuição

Qualquer técnica utilizada para localização e dimensionamento de GD e BC requer uma avaliação de cada solução gerada. Para que se faça essa avaliação, é necessária a obtenção do novo estado da rede com a instalação dos equipamentos seleccionados a fim de se verificar as perdas e o perfil da tensão, através do cálculo do trânsito de potência (TP).
Vários métodos para solução do problema de TP em redes de distribuição estão disponíveis na literatura especializada. Esses métodos podem dividir-se em duas grandes categorias: o Método da Soma das Correntes (SDC) ou Soma das Potências (SDP), e os métodos baseados na "Impedância Nodal Implícita" (Srinivas, 2000).
A primeira categoria é recomendada, principalmente, para sistemas puramente radiais, embora possa ser adaptada para redes com algumas poucas malhas (fracamente malhados). O método tem duas versões: a primeira tem uma formulação em temos de corrente (Shirmohammadi *et al.*, 1988), enquanto a segunda utiliza uma formulação baseada em potência (Broadwater *et al.*, 1988).
Os métodos baseados na matriz de impedâncias nodais utilizam uma formulação mais adequada para sistemas emalhados, baseando-se na formação da matriz de admitâncias nodais ($Y_{nó}$) e injecções de corrente equivalentes para resolver a rede. Neste método, o efeito da fonte e das cargas é representado separadamente por sobreposição (Chen et al., 1991).

Considerando o problema proposto no âmbito desta tese, localizar e dimensionar unidades GD e BC em redes de topologia radial, o método de TP baseado em SDP adoptado é apresentado com maior detalhe no Anexo A.

3.7. Considerações finais

Neste capítulo foram descritas as principais metodologias aplicadas para a localização e dimensionamento de GD em redes de distribuição. Pelos bons resultados apresentados pelos AGs na literatura especializada, foi adoptada neste trabalho uma abordagem deste tipo para efectuar a localização e dimensionamento em simultâneo de GD, BC e DRA. Os AGs são facilmente adaptáveis a problemas multi-objectivo de natureza combinatória e exploram uma população de soluções em cada iteração.

A proposta desenvolvida nesta tese visa a determinação do local e potência das unidades GD e BC a instalar em redes de distribuição radiais. No que respeita a esta questão, o trabalho concentra-se na determinação da potência e da melhor localização das fontes de GD. Com a instalação de várias unidades GD ao longo da rede, a tendência é a melhoria dos perfis de tensão nos vários nós da rede. Por outro lado, a proposta visa instalar DRA de modo a que, perante um eventual cenário de avarias, esta rede possa operar num regime de "ilhas". Isto é, todos ou uma parte dos consumidores (cargas) a jusante de uma avaria e confinados por DRA (zona), deverão poder continuar a ser alimentados, desde que exista alguma unidade GD nessa zona, durante o tempo de reparação da avaria. Estas "ilhas" visam minorar a indisponibilidade do sistema.

Nesta tese propõe-se um modelo multi-objectivo para dimensionar e identificar os locais óptimos para instalação de um conjunto de unidades GD, BC e DRA. Nesta análise utiliza-se um AG onde está presente um processo elitista que apresenta uma série de vantagens, nomeadamente a obtenção de um conjunto de soluções robustas e bem distribuídas. As soluções apresentadas por esta metodologia devem ser encaradas pelo decisor como apoio à tomada de decisões devidamente fundamentadas técnica e economicamente, e não como prescrições definitivas.

4. OPTIMIZAÇÃO MULTI-OBJECTIVO E AGS

Neste capítulo, depois de uma breve referência à optimização multi-objectivo, é feita uma introdução aos AGs, referindo, nomeadamente, as diferentes abordagens existentes e algumas das questões levantadas pela sua aplicação em modelos de programação multi-objectivo. São ainda abordadas outras questões, como sejam a problemática da avaliação de desempenho dos indivíduos e dos algoritmos, as diferentes possibilidades de incorporação de elitismo, as formas de lidar com as restrições e de preservação de diversidade na população.

4.1. Optimização Multi-objectivo

A complexidade e a dimensão dos problemas reais requerem que estes sejam tratados através de modelos e métodos que permitam a consideração de vários eixos de avaliação do mérito das soluções alternativas, de natureza diversa (económica, social, tecnológica, ambiental, etc). Dadas as características destes problemas, i.e., a existência de múltiplos aspectos de avaliação, a conflituosidade entre eles e a sua incomensurabilidade, não é possível, em geral, obter uma solução admissível que assegure o melhor valor para todos os critérios que operacionalizam esses aspectos de avaliação.

Um processo de apoio à tomada de decisão baseado em modelos matemáticos passa, usualmente, pelos seguintes passos:

- Formulação do problema,
- identificação das variáveis de decisão,
- identificação das funções objectivo,
- identificação das restrições,
- construção de um modelo,

- obtenção de soluções para o modelo instanciado com um conjunto de dados através da utilização de um algoritmo,
- análise crítica das soluções obtidas (podendo conduzir à revisão do modelo).

Os problemas caracterizados por múltiplos eixos de avaliação distinguem-se, em geral, entre problemas multiatributo e problemas multi-objectivo. Num problema multiatributo, as alternativas disponíveis são conhecidas à priori bem como o seu desempenho de acordo com os diferentes critérios. A resolução de um problema deste tipo passará, então, pela selecção, ordenação ou afectação a categorias pré-definidas das alternativas. Por sua vez, num problema multi-objectivo, as alternativas estão definidas implicitamente por um conjunto de restrições. Cada uma das alternativas é mapeada no espaço das funções objectivo, em que cada ponto tem como coordenadas os valores obtidos em cada função objectivo.

Nos problemas com uma única função objectivo a optimização "resume-se" a encontrar a solução óptima; o valor da solução óptima é único mesmo que existam soluções óptimas alternativas. No entanto, em problemas com múltiplas funções objectivo, em geral conflituosas, este conceito não é aplicável, pois uma solução admissível que optimiza um dos objectivos não optimiza, em geral, os restantes. Assim sendo, a noção de solução óptima dá lugar à noção de solução não dominada (óptima de Pareto, eficiente ou não inferior), que se caracteriza por não existir outra solução admissível que seja melhor em todos os aspectos de avaliação. A melhoria num objectivo é feita à custa da degradação em pelo menos um dos outros (Clímaco et al., 2003).

A identificação de uma solução de compromisso final, utilizando um método dedicado a problemas de optimização com objectivos múltiplos, passará pela intervenção do agente de decisão. Isto é, a comparação entre soluções não dominadas não permite, por si só, obter uma ordenação para essas soluções. Os métodos de apoio à decisão em problemas de programação multi-objectivo podem ser classificados dependendo do momento em que o agente de decisão (AD) introduz as suas preferências (Clímaco et al., 2003):

- *Métodos com articulação à priori de preferências*. Nestes métodos as preferências do decisor, fixados alguns parâmetros, ficam definidas à partida. Desta forma, um problema será transformado num problema com

uma única função objectivo, culminando numa solução de compromisso óptima.

- *Métodos sem articulação de preferências do decisor*. Nestes métodos há uma sequência de fases de cálculo de soluções não dominadas, que são depois apresentadas ao AD para escolha. Isto é, as decisões são tomadas a jusante da geração do conjunto de soluções não dominadas;
- *Métodos com articulação progressiva das preferências*. Nestes métodos interactivos a incorporação das preferências do decisor é efectuada em etapas de diálogo com o decisor que alternam com etapas de cálculo, até se atingir uma dada condição de paragem.

Assim sendo, um problema de optimização multi-objectivo pode definir-se como consistindo na pesquisa de um vector de valores para as variáveis de decisão que satisfaçam um conjunto de restrições e optimize, no sentido de Pareto, um vector de funções cujos elementos representam as funções objectivo que constituem uma descrição matemática dos critérios de desempenho (Clímaco et al., 2003).

A solução que se atinge no fim do processo de decisão deve ser uma solução de compromisso satisfatória entre os diversos objectivos que, após a identificação das soluções não dominadas e a intervenção das preferências do decisor, é considerada uma solução aceitável para o problema.

O problema de optimização multi-objectivo consiste em encontrar o vector, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, que satisfaça um conjunto de restrições (de desigualdade $g_j(x)$ e de igualdade $h_k(x)$) e que optimize o vector de funções, de dimensão P, $f(x) = \big(f_1(x), f_2(x), \dots, f_P(x)\big)$.

$$\begin{aligned} Max \text{ ou } Min \quad & f_p(x), && p = 1,2,\dots,P \\ \text{s.a.} \quad & g_j(x) \geq 0, && j = 1,2,\dots,J \\ & h_k(x) = 0, && k = 1,2,\dots,K \\ & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, && i = 1,2,\dots,n \end{aligned} \tag{4.1}$$

Os valores $x_i^{(L)}$ e $x_i^{(U)}$ representam o mínimo e o máximo valor respectivamente para a variável x_i. Uma solução x é admissível se satisfizer as J+K restrições e os $2n$ limites. Caso contrário, a solução será não admissível. O conjunto de todas as soluções admissíveis designa-se por *espaço de pesquisa D* (figura 4.1).

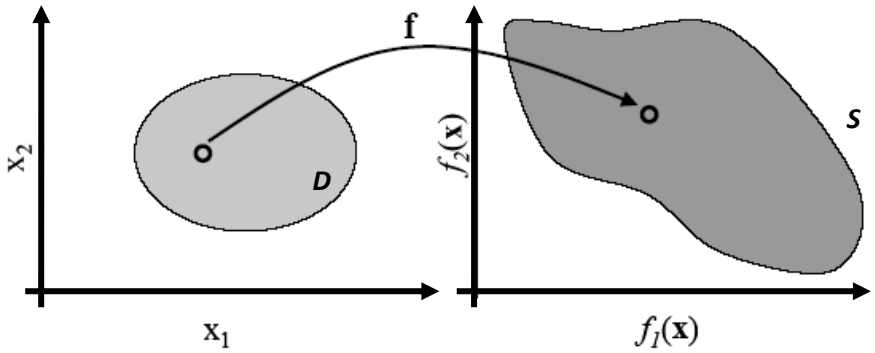

Figura 4.1 – Espaço das variáveis e espaço dos objectivos (Costa, 2003).

Para funções objectivo a minimizar, o vector das variáveis de decisão $x' \in D$ é eficiente se e só se não existir outro $x \in D$ tal que $f_p(x) \leq f_p(x')$ para todo o $p=1,2,\ldots, P$ e $f_p(x) < f_p(x')$ para pelo menos um p. A frente óptima de Pareto (não dominada) é constituída pelas imagens das soluções eficientes no espaço das funções objectivo (figura 4.2).

O vector das variáveis de decisão $x' \in D$ é fracamente eficiente se e só se não existir outro $x \in D$ tal que, $f_p(x) \leq f_p(x')$ para todo o $p=1,2,\ldots, P$.

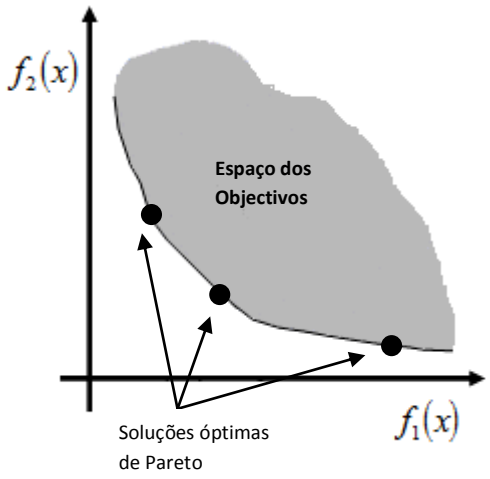

Figura 4.2 – Soluções óptimas de Pareto

No entanto, nem sempre as soluções convergem para uma frente óptima global de Pareto, podendo convergir apenas para uma frente óptima local de Pareto. A Figura 4.3 mostra duas frentes óptimas locais de Pareto no espaço dos objectivos.

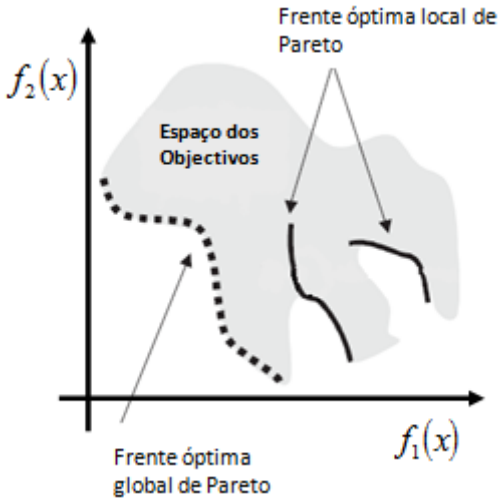

Figura 4.3 – Frentes óptimas de Pareto locais e globais (Deb, 2001).

A natureza combinatória de muitos problemas multi-objectivo torna difícil a utilização de métodos de programação matemática, conduzindo à adopção de heurísticas. Estas abordagens requerem um menor esforço computacional, sendo mais simples e flexíveis, mas não garantem a obtenção de soluções óptimas de Pareto, mas apenas de soluções eventualmente próximas do conjunto de Pareto. No entanto, a experiência revelou que as heurísticas estavam mais vocacionadas para serem aplicadas a problemas bem específicos, o que as tornava algo "prisioneiras" de características bem marcadas. Com o intuito de tornar estas abordagens mais flexíveis e polivalentes (passíveis de serem usadas em problemas diferenciados), foram propostas abordagens de mais alto nível com capacidade adaptativa, as meta-heurísticas.

Muito genericamente, as meta-heurísticas dividem-se em:

- *Abordagens que exploram a vizinhança de uma solução em cada iteração,* alterando a vizinhança assim como a forma como esta é explorada, sendo escolhido apenas um elemento dessa vizinhança nessa iteração. Este tipo de busca de soluções cria um caminho ou trajectória única de pesquisa. Como exemplos temos o *Tabu Search* (Glover e Laguna, 1997) e o *Simulated Annealing* (Schneider e Kirkpatrick, 2006).
- *Abordagens que exploram uma população de soluções em cada iteração,* explorando várias regiões do espaço de soluções de cada vez no decurso do processo de pesquisa, sendo aqui de realçar os *Algoritmos Genéticos,* a

Particle Swarm Optimization (PSO) e a *Ant Colony Optimization (ACO)* (Glover e Kochenberger, 2003).

Dadas as vantagens das meta-heurísticas, em particular a flexibilidade e a facilidade de adaptação aos mais diversos tipos de problemas, associadas à rapidez na obtenção de soluções, estas abordagens têm ganho crescente importância na resolução de problemas reais complexos de natureza combinatória.

Actualmente surgem muitos algoritmos híbridos, que são caracterizados por utilizarem mais do que uma meta-heurística na sua implementação, de modo a fazerem um uso combinado das suas potencialidades.

4.2. Algoritmos Evolucionários

Os algoritmos evolucionários são técnicas de pesquisa baseadas na simulação do processo evolutivo de selecção natural. Estes algoritmos trabalham com um conjunto de representações de potenciais soluções, as quais são susceptíveis de sofrerem evolução, o que os torna particularmente úteis em situações com múltiplos óptimos locais ou em problemas com múltiplos objectivos. Como estes algoritmos simulam o processo de evolução natural, em que a evolução ocorre com a selecção natural a premiar os indivíduos mais bem adaptados ao seu ambiente, surge a necessidade de introduzir instrumentos tais como uma função de avaliação e operadores que permitam seleccionar, recombinar e introduzir alterações nas soluções. Assim, as soluções que apresentam melhor desempenho têm maior probabilidade de serem total ou parcialmente copiadas para a iteração seguinte. A ideia é replicar em populações artificiais os mecanismos de reprodução, com o consequente cruzamento de material genético e de mutação que permitem introduzir "novos" indivíduos numa população. O algoritmo evolucionário deve convergir, no sentido de apresentar soluções cada vez com melhor desempenho.

Os algoritmos evolucionários podem distinguir-se fundamentalmente em *algoritmos de programação evolucionária* e *algoritmos genéticos*.

Na *programação evolucionária*, cada indivíduo é uma representação real das variáveis de decisão (usa directamente as variáveis de decisão), podendo ser implementada na forma (1+1), em que um indivíduo é usado para criar um

descendente através da mutação, ou na forma (μ+λ) ou (μ,λ). Na forma (μ+λ), são criados λ indivíduos a partir de μ progenitores, também com recurso ao operador mutação com uma distribuição normal, e a nova geração é constituída pelas melhores μ soluções de entre os μ+λ pais e filhos. Na implementação (μ,λ), com $\lambda > \mu$, os μ pais dão origem a λ filhos, com recurso ao operador mutação, e dos λ filhos assim obtidos são escolhidos os μ melhores para formarem a próxima geração (Bäck, 1996). A geração seguinte é obtida a partir do conjunto constituído pelos progenitores e descendentes, onde a selecção se faz de entre os melhores do conjunto, ou seja, usam uma estratégia elitista.

Nos *AGs*, cada indivíduo da população é avaliado de acordo com o seu desempenho perante cada um dos objectivos. Do processo de avaliação surgem (escolhidos probabilisticamente) indivíduos que serão os progenitores da próxima geração, aos quais são aplicados, de uma forma não determinística, os operadores cruzamento e mutação e depois construída a nova população. O cruzamento combina dois (ou mais) progenitores para produzir descendentes que possuem a contribuição genética de ambos os pais. O operador mutação, por sua vez, faz a modificação de material genético nos descendentes. Ao combinar vários indivíduos, os algoritmos genéticos usam o historial da população para gerar as novas soluções. Os AGs, quando implementados na sua forma mais básica, fazem pouco uso da informação que possa existir acerca do processo de pesquisa. Assim sendo, não oferecem garantia de convergência ou podem registar uma convergência lenta, antes de atingirem uma solução final. Todavia, estas aparentes desvantagens dos AGs podem facilmente ser ultrapassadas implementando processos elitistas ou fornecendo-lhes sempre que possível informação acerca do processo evolutivo (Gomes, 2004).

Assim, as principais diferenças entre estas duas abordagens assentam na representação dos indivíduos, na concepção dos operadores e nos mecanismos de selecção e reprodução.

O que torna os algoritmos evolucionários particularmente atractivos na resolução de problemas multi-objectivo reside na sua capacidade de abordagem global do problema, ao possuir em cada geração uma população de potenciais soluções, de pesquisa e de selecção. Daqui para a frente será feita referência sobretudo aos AGs, por ser o tipo de algoritmo implementado neste trabalho, apesar da implementação

desenvolvida utilizar, de forma mais ou menos generalizada, as características típicas de uma das abordagens na outra abordagem, com o consequente esbatimento das fronteiras entre elas.

4.3. Algoritmos Genéticos

4.3.1. Estrutura do algoritmo

A estrutura básica do algoritmo genético pode ser apresentada através do fluxograma da figura 4.4.

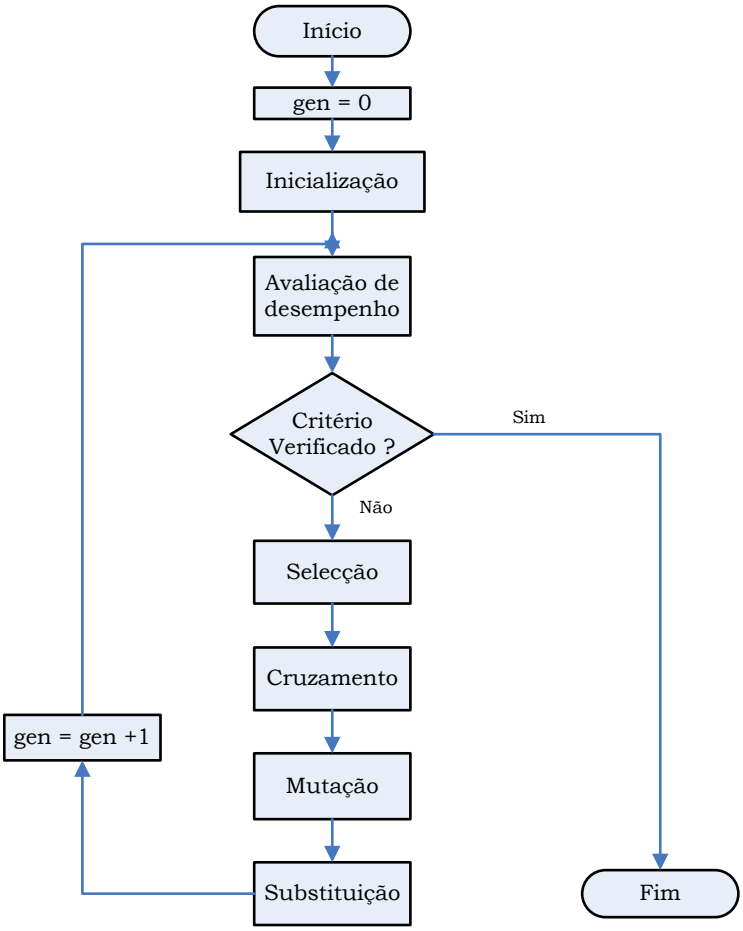

Figura 4.4 - Fluxograma do funcionamento básico do algoritmo genético

Em primeiro lugar é gerada aleatoriamente uma população inicial de indivíduos, os quais constituem uma codificação das soluções (*inicialização*). Em seguida é avaliada a aptidão, ou desempenho, de cada indivíduo e aplicam-se sucessivamente os operadores genéticos: *selecção*, *cruzamento* e *mutação*. O resultado da aplicação destes operadores é uma população com uma nova geração de indivíduos que

substituirão os indivíduos pertencentes à geração anterior (*substituição*). O desempenho dos novos indivíduos é avaliado e é testado um critério de paragem do algoritmo. A condição de paragem pode ser, por exemplo, o número máximo de gerações atingido ou o tempo disponível esgotado, a estagnação da população em termos de qualidade, ou o AD já estar satisfeito com os resultados obtidos com os indivíduos / soluções de uma dada geração.

A tabela 4.1 estabelece a correspondência entre a terminologia utilizada em algoritmos clássicos de optimização e em AGs.

Algoritmos genéticos	**Optimização clássica**
Indivíduo	Solução
População	Conjunto de soluções
Desempenho ou aptidão	Função objectivo
Geração	Iteração
Aplicação de operadores genéticos	Geração de novas soluções

Tabela 4.1- Comparação de terminologias

Algumas características que distinguem os AGs dos métodos clássicos são as seguintes:

- Em vez de lidarem directamente com os valores das variáveis de decisão, utilizam uma codificação dessas variáveis;
- Utilizam operadores probabilísticos (selecção, cruzamento e mutação) em vez de operadores determinísticos (por exemplo, operações baseadas no gradiente);
- Em vez da pesquisa ser efectuada num ponto da região admissível em cada iteração, esta é feita com base numa população de pontos em cada iteração;
- Não são utilizadas derivadas ou outras informações auxiliares a respeito das funções objectivo, sendo apenas requerida a avaliação das funções nos pontos do espaço de pesquisa.

No quadro de um processo de optimização multi-objectivo os AGs tornam-se particularmente atractivos, dado que em cada iteração disponibilizam um conjunto de soluções representativas de diferentes regiões do espaço de pesquisa, permitindo

caracterizar a frente não dominada (na presença das preferências do AD, de modo que sejam compreensíveis os compromissos a estabelecer aquando da selecção de uma solução a implementar).

4.3.2. Codificação das variáveis

A codificação das variáveis de decisão (de projecto) deve ser apropriada às características do problema a resolver. O AG básico utiliza uma codificação binária das variáveis caracterizada por um cromossoma contendo vários genes, cada qual podendo tomar o valor 0 ou 1. No entanto, mais genericamente os genes do cromossoma podem ser números reais, inteiros, caracteres, etc. A maioria das aplicações utiliza uma codificação binária.

4.3.3. Inicialização e dimensão da população

A evolução de uma população parte sempre de uma população inicial que é normalmente gerada de forma aleatória. Pretende-se a diversidade entre os indivíduos da população inicial de forma a permitir uma exploração inicial alargada do espaço de pesquisa. Para o efeito, é desejável utilizar um gerador de números aleatórios de distribuição uniforme. No entanto, a população inicial pode ser constituída com base em informação já disponível.

As formas utilizadas para criar a população inicial pretendem apresentar um melhor ponto de partida para a evolução de uma população. A forma de criação da população inicial influencia também o tempo de convergência do algoritmo, que depende também da dimensão da população. Populações grandes implicam um maior tempo computacional; no entanto, em geral apresentam uma melhor convergência devido à maior diversidade que proporcionam. Pequenas populações, por sua vez, apresentam em geral melhor progressão no início, mas com piores resultados finais dado que a menor diversidade induzida por poucos indivíduos pode levar a uma convergência para óptimos locais.

A escolha da dimensão da população para cada problema não é uma tarefa fácil. Na prática, procede-se a um conjunto de testes empíricos. Tipicamente, começa-se com uma dimensão pequena e, depois, testam-se dimensões maiores. No final, quando estão testadas 5 a 10 populações de dimensões diferentes, é possível ter alguma sensibilidade sobre a influência deste parâmetro no desempenho do AG e, assim, pode fazer-se uma escolha mais criteriosa para o valor deste parâmetro.

Quanto ao número de gerações do AG, este geralmente é fixo à partida e deverá ser suficientemente elevado para permitir a convergência. Uma ideia interessante apresentada por alguns investigadores relaciona a dimensão da população e o número de gerações necessárias com o número de genes do cromossoma (Chen e Rajan, 2000; Chen e Rajan, 1998). Estes trabalhos, baseados na experimentação, permitiram concluir que bons resultados no desempenho do AG eram conseguidos quando a dimensão da população e o número de gerações estava compreendido entre um valor idêntico ao número de genes do cromossoma e duas vezes esse valor.

4.3.4. Avaliação da aptidão dos indivíduos da população

Como cada nova geração resulta de um processo iterativo de evolução, surge a questão sobre que indivíduos de uma população se devem seleccionar e reproduzir para criar uma nova geração, desejavelmente de melhor qualidade.

A determinação do valor de aptidão dos indivíduos é concretizada através de uma função de avaliação, que permite comparar a respectiva qualidade. Assim, quanto mais elevado for o valor de aptidão de uma solução, maior é a sua capacidade de sobrevivência e reprodução e, consequentemente, maior é sua representação na próxima geração.

Num ambiente multi-objectivo, a qualidade de cada indivíduo passa pela avaliação deste em relação às diferentes funções objectivo. A aptidão de cada indivíduo representa geralmente mais do que a avaliação de cada indivíduo em relação a cada função objectivo, podendo abranger também questões relacionadas com a aceleração da convergência, a inclusão de eventuais penalizações, a promoção da diversidade, etc, de modo a favorecer a pesquisa.

4.3.5. Selecção

O operador selecção baseia-se no princípio da "sobrevivência dos mais aptos", ou seja, os indivíduos com melhores valores de aptidão têm uma maior probabilidade de serem seleccionados para reprodução. Isto é, de uma determinada população são seleccionados os indivíduos que serão os progenitores da geração seguinte. Este operador é a versão artificial da selecção das espécies do Darwinismo, que

estabelece que os seres mais aptos têm maior probabilidade de sobreviver e transmitir as suas características aos descendentes.

O objectivo principal do operador de selecção é assegurar a manutenção da população de indivíduos com bons valores de aptidão e eliminar soluções com baixos valores de aptidão (Deb, 2001). A selecção num AG é geralmente implementada como um operador probabilístico, no qual o valor da aptidão dos indivíduos tem um papel a desempenhar.

No AG básico a selecção de indivíduos é feita aos pares de modo que cada par dá origem a dois novos indivíduos através dos operadores de cruzamento e mutação. Na selecção proporcional a probabilidade p_i (4.2) do *i-ésimo* indivíduo da população vir a ser seleccionado para reprodução é proporcional ao seu valor de aptidão, f_i:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{N} f_i} \tag{4.2}$$

Nesta expressão, os valores de f_i deverão ser todos positivos. Para implementar esta selecção proporcional à aptidão utiliza-se o "método da roleta". Assim, os indivíduos de melhor aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de pior aptidão ocuparão uma porção relativamente menor. O número esperado de vezes que o indivíduo i é seleccionado pode ser calculado por $n \times p_i$, onde n é o tamanho da população, ou então pelo quociente $f_i / \overline{f}$ em que $\overline{f}$ representa a média dos valores de aptidão da população. Deste modo, estima-se que os indivíduos de melhor aptidão (muito acima da média) sejam seleccionados várias vezes para reprodução, enquanto os de indivíduos com pior desempenho (inferior à média da população) serão comparativamente muito menos vezes seleccionados.

O método de selecção proporcional ao valor da aptidão apresenta essencialmente duas desvantagens. Por um lado, os indivíduos que apresentem elevado valor de aptidão são favorecidos com um grande número de descendentes nas gerações futuras, o que reduz a diversidade e pode conduzir a uma convergência prematura do algoritmo para um óptimo local. Por outro lado, depois de várias gerações, apesar de poder ainda existir alguma diversidade entre os indivíduos da população, poderá acontecer que a média dos valores de desempenho da população esteja muito próxima dos melhores valores de desempenho. Deste modo, pode verificar-se

uma estagnação na evolução do algoritmo pois a probabilidade de selecção dos melhores indivíduos torna-se indistinguível da probabilidade de selecção dos restantes indivíduos.

Pelas razões apontadas, é usual combinar-se a selecção proporcional à aptidão com técnicas de mudança de escala (*scaling*) dos valores de aptidão (Kallassy e Marcelin, 1997). Geralmente, a mudança de escala é linear de modo a que o declive da recta influencie o nível de competição entre os indivíduos da população aquando da selecção. Essencialmente, pretendem-se atingir dois efeitos:

- Nas primeiras gerações procura-se através da mudança de escala atenuar as diferenças de aptidão entre os diferentes indivíduos da população (declive da recta baixo);
- Em gerações avançadas do algoritmo, procura-se introduzir diferenças entre os valores de aptidão dos indivíduos (aumento do declive da recta), de modo a contrariar a formação de uma população homogénea que conduziria à estagnação da pesquisa.

Para contornar as dificuldades associadas à mudança de escala (em particular, a regulação do declive da recta), surgiram técnicas baseadas na ordenação (*ranking*). Neste caso, os indivíduos da população são ordenados pela sua aptidão, do melhor para o pior. Depois, a cada indivíduo é atribuída uma probabilidade de selecção p_i calculada com base numa dada distribuição, de modo que $\Sigma\ p_i = 1$. As distribuições mais comuns são a linear e a exponencial. Comparativamente à selecção proporcional ao valor da aptidão, esta técnica apresenta duas vantagens:

- Trava a convergência prematura do algoritmo, pois não é especialmente favorecida a selecção dos melhores indivíduos;
- Em gerações avançadas do algoritmo, evita-se a estagnação da pesquisa característica de populações homogéneas, pois a aptidão de cada indivíduo é determinada pelo valor da posição numa lista ordenada.

No entanto, esta técnica requer um esforço computacional acrescido devido a ordenamentos constantes.

Os métodos de selecção abordados anteriormente baseiam-se numa implementação do tipo roleta. Outros métodos de selecção são (Goldberg, 1989):

- Selecção determinística;

- Selecção estocástica com ou sem reposição;
- Selecção estocástica remanescente com ou sem reposição;
- Selecção por torneio.

Destes métodos destaca-se o método de selecção por torneio (Yang e Soh, 1997, Crossley, Cook e Fanjoy, 1999). Neste caso selecciona-se da população um número i de indivíduos (designado por dimensão do torneio) e realiza-se um torneio entre eles. Os valores de aptidão de cada um são comparados entre si e, se se pretender a minimização, o que tiver menor valor é o vencedor sendo o seleccionado para reprodução. Valores de i elevados aumentam a pressão selectiva. Por esta razão, o valor de i em muitas aplicações é tipicamente $i = 2$. Algumas vantagens que tornam a aplicação deste método de selecção atraente são as seguintes:

- Não conduz, em geral, a convergência prematura (desde que a dimensão do torneio seja pequena);
- Combate a estagnação do algoritmo;
- É simples de implementar e não requer esforço computacional extra como é o caso da técnica baseada na ordenação ou mudança de escala;
- Não interessa o valor absoluto da aptidão dos indivíduos, mas apenas o valor relativo. Isto significa que este método de selecção pode lidar com valores negativos.

4.3.6. Elitismo

Normalmente, o elitismo surge associado ao operador selecção com o objectivo de se aumentar a velocidade de convergência do algoritmo, através da garantia da preservação dos melhores indivíduos de uma geração e que estes sejam copiados integralmente para as próximas gerações sem nenhuma alteração. Os outros indivíduos da população são gerados normalmente, através do método de selecção e posterior aplicação dos operadores genéticos. Assim, as melhores soluções não são apenas passadas de uma geração para outra, mas também participam na criação dos novos membros da nova geração.

No entanto, num contexto multi-objectivo a implementação do elitismo requer alguns cuidados. Ao contrário do caso mono-objectivo, deixa de existir uma solução candidata a eleita, passando a existir um conjunto de soluções não dominadas. A questão é saber quais devem ser as eleitas. A implementação mais comum consiste na criação de uma população "extra" (elite), constituída por num número reduzido

de indivíduos não dominados, geralmente os melhores de cada geração. A interacção dessa nova população "elite" com a população "normal" depende muito do tipo de problema em estudo. Daí que na literatura (tabela 4.2) existam exemplos de diferentes formas de a elite influenciar a população.

Autores	**Como inserir os indivíduos elite na população**
Deb et al., 2000 e Rudloph, 2001	Cada geração da população resulta dos melhores indivíduos do conjunto população actual e seus descendentes.
Ishibuchi e Murata, 1998	Uma percentagem da população actual pode ser substituída por indivíduos escolhidos de forma aleatória da população elite.
Zitzler e Thiele, 1998	A aptidão de cada indivíduo na população "normal" pode ser atribuída em função da avaliação de cada indivíduo na população elite que o domina.
Deb, 2001	Identificação dos eleitos através do cálculo da distância dos indivíduos da população à população elite.

Tabela 4.2 - Diferentes formas de influenciar a população através do elitismo (Gomes, 2004).

No AG básico sem o elitismo, a convergência é, em geral, mais lenta e não existe garantia de que o melhor indivíduo da última geração seja o melhor de todos os encontrados durante a pesquisa.

A desvantagem do operador elitismo acontece quando os melhores indivíduos encontrados são os mesmos durante um número consecutivo de gerações, o que pode levar à presença de várias cópias desses indivíduos em cada geração. Este aspecto tem como efeito a perda de diversidade entre os indivíduos da população e geralmente força a pesquisa na direcção de algum ponto óptimo local. Para combater este efeito, o elitismo pode ser utilizado não de forma constante mas aplicado de forma "intermitente", sempre que esteja decorrido um número fixo de gerações.

4.3.7. Cruzamento

O operador *selecção* selecciona indivíduos para a reprodução. A reprodução é caracterizada pelos operadores *cruzamento* e *mutação*. O operador cruzamento tem por objectivo combinar a informação genética de ambos os progenitores, isto é, este operador permite a troca de material genético entre dois indivíduos denominados pais, combinando as informações genéticas de maneira que exista uma

probabilidade razoável dos novos indivíduos produzidos serem melhores que os seus pais (Deb, 2001).

As formas mais comuns de cruzamento em algoritmos genéticos são de um *ponto de cruzamento*, de *dois pontos de cruzamento* e *cruzamento uniforme*.

Na reprodução baseada num ponto de cruzamento (*single-point crossover*), o ponto de quebra do cromossoma é escolhido de forma aleatória e a partir desse ponto realiza-se a troca cromossomática entre os dois indivíduos (figura 4.5).

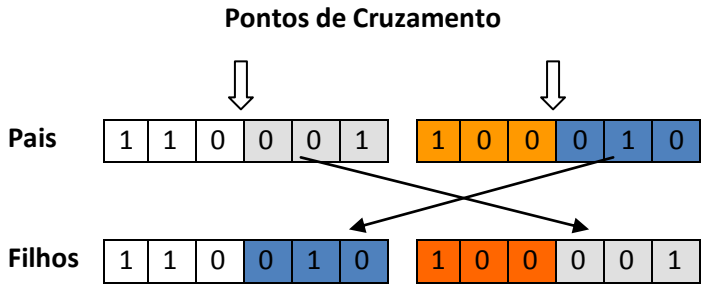

Figura 4.5 - Cruzamento de um ponto

Na reprodução baseada em dois pontos de cruzamento (*two-point crossover*), procede-se de forma similar ao cruzamento de um ponto, mas a troca de segmentos é realizada a partir de dois pontos (figura 4.6).

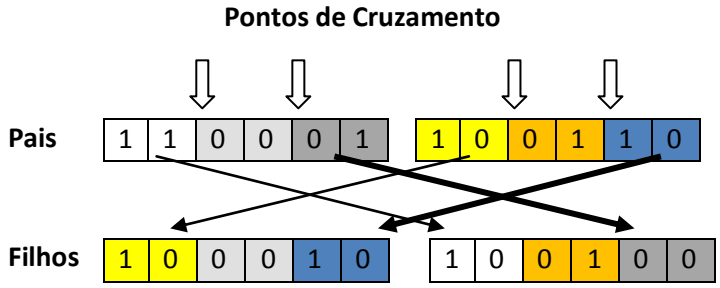

Figura 4.6 - Cruzamento de dois pontos

Na reprodução baseada em cruzamento uniforme (*uniforme crossover*), cada gene do descendente é criado através da cópia de um gene dos pais, escolhido de acordo com uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Onde houver 1 na máscara de cruzamento, o gene correspondente será copiado do primeiro pai e onde houver 0 será copiado do segundo. O processo é repetido com os pais trocados para

produzir o segundo descendente. Uma máscara de cruzamento é criada para cada par de pais. A figura 4.7 mostra graficamente o processo.

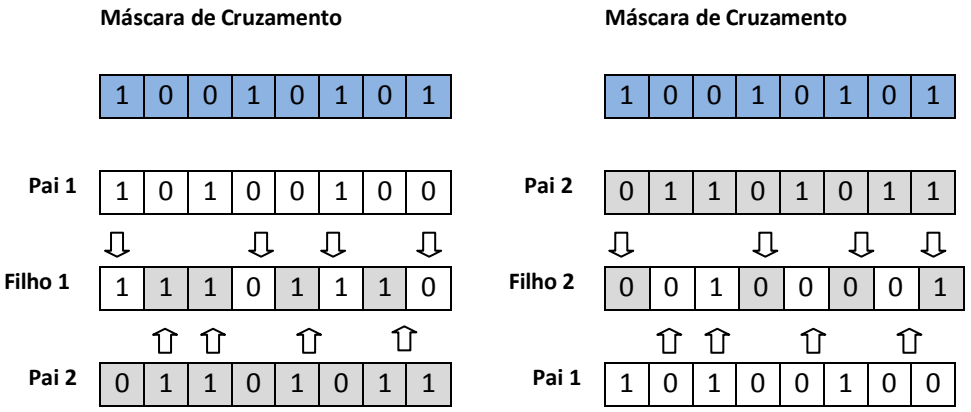

Figura 4.7 - Cruzamento Uniforme

Em geral, nem todos os pares de cromossomas seleccionados como progenitores são submetidos a cruzamento. O operador de cruzamento aplica-se com uma determinada probabilidade de ocorrência, p_c. Isto significa que cromossomas seleccionados da geração actual podem ser directamente copiados para a geração seguinte, a menos que ocorra mutação de algum gene conforme explicado em 4.3.8. O teste de ocorrência ou não de cruzamento é implementado recorrendo a um mecanismo probabilístico. Para tal, deve-se definir uma probabilidade de cruzamento p_c igual para cada par de progenitores seleccionado. Para cada par, é gerado um número aleatório μ entre 0 e 1. Por comparação do número μ com a probabilidade p_c, testa-se a possibilidade ou não de cruzamento: se $\mu < p_c$ então o cruzamento é permitido; caso contrário, os progenitores permanecem inalterados.

O cruzamento pode ter um efeito destrutivo sobre os cromossomas que se revelam mais aptos no decurso das gerações. Deste ponto de vista, o cruzamento simples terá uma menor influência destrutiva do que o cruzamento multiponto. No entanto, um dos efeitos benéficos do cruzamento é gerar diversidade entre os indivíduos o que pode ser melhor conseguido nas primeiras gerações com implementações tipo multiponto. O efeito destrutivo pode ser atenuado através da utilização de elitismo.
Na resolução de diferentes problemas, nem sempre é o mesmo tipo de cruzamento que permite o melhor desempenho do algoritmo. A utilização destas técnicas de cruzamento, na generalidade dos problemas, não demonstra diferenças de desempenho significativas que justifiquem o uso de um tipo de cruzamento e

exclusão dos outros. Com o intuito de melhorar o AG no sentido de travar a convergência prematura, o que confere uma maior robustez ao algoritmo, Andre, Siarry e Dognon (2001), desenvolveram um algoritmo em que durante as primeiras gerações, a probabilidade de cruzamento diminui para os melhores indivíduos e aumenta para os piores indivíduos. Nas últimas gerações, os melhores indivíduos recebem uma probabilidade de cruzamento elevada para garantir convergência.

É necessário ter atenção ao valor a atribuir a este parâmetro, pois caso este parâmetro apresente uma probabilidade elevada, maior é a diversidade de cromossomas introduzidos na geração seguinte, o que poderá ser positivo até certo ponto, podendo também suceder que as melhores soluções encontradas sejam destruídas quando os respectivos cromossomas são afectados pelo operador cruzamento. Por outro lado, se a probabilidade de cruzamento é baixa, o algoritmo terá uma convergência lenta. Em geral, os valores para este parâmetro variam entre 0,5 e 1.

4.3.8. Mutação

A mutação é vista como o operador responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética na população. A sua operação consiste em alterar aleatoriamente com uma determinada probabilidade, p_m, um ou mais genes (0 passa a 1 e vice-versa no caso da representação binária) de um indivíduo escolhido entre a população.

O operador cruzamento gera novos indivíduos, mas por si só não permite uma exploração alargada do domínio, uma vez que lida apenas com informação genética contida na geração actual. Ligeiras mutações genéticas nos indivíduos destinados a formar uma nova geração surgem como um complemento ao efeito do operador cruzamento, contribuindo para explorar melhor o espaço das soluções.

Idealmente, pretende-se com a mutação que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de pesquisa nunca seja zero e, deste modo, procura-se escapar à optimalidade local. No entanto, a geração de diversidade entre os indivíduos de uma população através de mutação tem que ser controlada. Uma taxa de mutação muito elevada resulta numa grande diversidade de indivíduos em cada nova geração, o que impede a convergência do algoritmo para zonas promissoras do espaço de pesquisa e finalmente para um valor óptimo de Pareto. Sendo assim, o

operador mutação é aplicado mediante uma determinada probabilidade p_m que, em geral, é pequena ou muito baixa comparativamente à probabilidade de cruzamento. A figura 4.8 ilustra o processo de mutação num indivíduo.

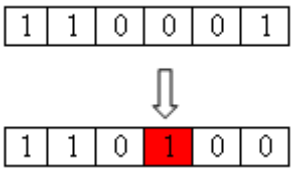

Figura 4.8 – Mutação

Como os demais parâmetros, a probabilidade de mutação ideal dependerá do problema em causa. Todavia, os valores utilizados costumam variar entre 0,001 e 0,1. De facto, são valores muito baixos, pois valores muito elevados podiam tornar o algoritmo genético num algoritmo de pesquisa puramente aleatória (*random walk*).

4.3.9. Substituição da população

Após a aplicação dos operadores genéticos, procede-se à substituição da geração anterior pelos seus descendentes. Esta substituição pode ser efectuada de formas distintas, com recurso a dois métodos (Hifi, 1997; Valenzuela e Uresti, 1997):

- *Método geracional*, em que toda a população é substituída incondicionalmente;
- *Método incremental*, no qual se substitui a população apenas parcialmente, muitas vezes apenas o pior indivíduo, podendo os novos indivíduos substituir aleatoriamente outros indivíduos na população dos progenitores, os elementos mais velhos, os mais semelhantes a si, os próprios progenitores ou os piores elementos.

4.3.10. Critério de paragem

No AG básico o critério de paragem utilizado consiste na definição à priori de um número máximo de gerações que o algoritmo deverá executar. Aliás, este é o critério mais simples de aplicar e também o mais utilizado na generalidade dos problemas.

4.3.11. Parametrização

Basicamente, os parâmetros que necessitam de ser escolhidos para o funcionamento dos AGs são: dimensão da população N_P, probabilidade de cruzamento p_c, probabilidade de mutação p_m e número máximo de gerações k.

A escolha dos parâmetros do AG para a resolução de um determinado problema é usualmente realizada por tentativas. Não existe um modo fácil de estipular valores que se apliquem a qualquer problema, usando-se habitualmente duas abordagens distintas: *afinação* e *controlo*.

Na primeira (*afinação*) recorre-se à experimentação, isto é, executa-se sucessivamente o algoritmo com diferentes conjuntos de parâmetros, sendo assim identificados os que produzem melhores resultados. O facto de os parâmetros não serem independentes entre si é um inconveniente desta abordagem. Geralmente, o processo de afinação individual é difícil e muito demorado. Os parâmetros devem apresentar um comportamento dinâmico e flexível, adaptando-se às diferentes etapas do processo evolutivo, já que a composição da população varia de geração em geração e os valores dos parâmetros que induzem um bom comportamento numa dada população podem ser ineficientes com outra.

Na abordagem de controlo, os valores dos parâmetros são função do tempo (usualmente o número de gerações) e eventualmente dos resultados do algoritmo. Esta abordagem apresenta duas alternativas para fazer evoluir os parâmetros:

- *Controlo adaptativo*, consiste em fazer uso de eventual informação que exista acerca da pesquisa e introduzir modificações nos parâmetros de acordo com essa informação (Michalewicz e Fogel, 2000).
- *Controlo auto-adaptativo*, no qual os parâmetros estão incorporados na representação das soluções do problema podendo, assim, evoluir ao longo da simulação (Eiben et al., 1999).

4.3.12. Controlo da Diversidade

A convergência de um AG é uma questão crucial na resolução de problemas. Para garantir a convergência, os operadores genéticos tanto podem ser responsáveis por induzirem numa população pouca diversidade como uma grande diversidade, trazendo vantagens e inconvenientes. Por exemplo, se o processo de convergência

resulta numa população pouco diversa, pode-se traduzir numa mais-valia se se está em torno de um óptimo global, como também pode ser um inconveniente se esse óptimo for local. A convergência pode ser controlada usando os operadores mutação e cruzamento. O aumento do tamanho da população será uma outra alternativa para evitar uma convergência prematura (apesar do "peso" computacional que representa).

No entanto, para tratar problemas de optimização multi-objectivo torna-se necessário implementar mecanismos de controlo de diversidade na população. Os métodos de nichos têm a capacidade de criar e manter populações diversas. A técnica de "*niching*" consiste na divisão da população em espécies (que reúnem indivíduos com características semelhantes) para reduzir a competição e criar sub-populações estáveis, cada uma delas concentrada num nicho do espaço de pesquisa. Um dos mecanismos de controlo de diversidade mais utilizado é o da partilha na medida do desempenho (*sharing*) (Gomes, 2004).

Na literatura são normalmente utilizados dois tipos de métodos: *sharing* e *crowding*.

O mecanismo de *sharing ou partilha* altera apenas o procedimento de atribuição do valor da função de avaliação de um indivíduo. Isto é, altera a função de avaliação de cada elemento da população de acordo com um número de indivíduos semelhantes dentro de uma população (Mathfound, 2000). A partilha da função de avaliação (*fitness sharing*) de um indivíduo é igual à sua função de avaliação *F* dividida pelo seu contador de nichos (*niching count*). O contador de nichos (número de vizinhos) é a soma ponderada do número de indivíduos que pertencem ao seu nicho, ou seja que estão perto dele de acordo com uma certa distância σ_{share} (raio do nicho).

A expressão (4.3) representa a partilha de função de avaliação de um indivíduo *i*, onde N_P é o número de indivíduos da população e *d(i,j)* é a distância entre os indivíduos *i* e *j*:

$$F'(i) = \frac{F(i)}{\sum_{j=1}^{N_P} sh(d(i,j))} \tag{4.3}$$

A função de partilha (4.4) proposta por Goldberg e Richardson (1987) é definida como:

$$Sh(d) = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{d}{\sigma_{share}} \right)^{\alpha}, & se\ d \le \sigma_{share} \\ 0, & caso\ contrário \end{cases} \tag{4.4}$$

O parâmetro d representa a distância entre duas soluções, α define o comportamento da função *Sh*. Quando $d > \sigma_{share}$ significa que as soluções se encontram em nichos separados, sendo $Sh(d)=0$, isto é, não partilham a função de avaliação (um do outro). Caso $d \le \sigma_{share}$, $Sh(d)$ assume um comportamento decrescente em relação a $\dfrac{d}{\sigma_{share}}$, e $Sh(d)=1$ se os elementos são iguais.

O modelo de *sharing* pode proporcionar bons efeitos de diversificação, mas também apresenta desvantagens, sendo de salientar as seguintes:

- O modelo é dependente dos parâmetros α e σ_{share}. Segundo Deb e Goldberg (1989), o que é crítico para o desempenho do modelo não é tanto a escolha de α mas sim a escolha de σ_{share}. Sendo o seu valor fixado à priori, pode não revelar o verdadeiro conhecimento das características da função. Isto é, dois indivíduos podem ser englobados no mesmo nicho devido ao valor de σ_{share}, mas na realidade podem pertencer a "vales" diferentes, próximos um do outro.
- Apesar do objectivo deste modelo ser o de preservar aglomerados ou nichos de soluções, o operador cruzamento pode ter um efeito adverso sobres estes nichos quando são seleccionados para reprodução dois indivíduos de nichos diferentes. Isto significa que os indivíduos provenientes destes cruzamentos podem ficar isolados no espaço das soluções, não sendo penalizados pela sua *aptidão* segundo o modelo de partilha, ficando favorecidos em relação àqueles que pertencem a nichos. Para se mitigar este problema deve-se restringir o cruzamento entre indivíduos suficientemente próximos ou permitir apenas a substituição de um indivíduo por outro parecido.

Estas desvantagens fomentaram o desenvolvimento do método de identificação de aglomerados (*crowding*). Este método consiste na inserção de novos indivíduos na população substituindo indivíduos similares. Da mesma forma que o método de partilha, utiliza uma medida de distância, genotípica (espaço das populações) ou fenotípica (espaço das variáveis), para encontrar indivíduos similares (Deb e Goldberg, 1989). Decorridas algumas gerações, a formação de aglomerados de

indivíduos ocorre nas regiões do espaço de pesquisa com elevado potencial. A identificação destas regiões é importante a fim de preservar os nichos associados a cada uma delas fazendo-os evoluir em paralelo para o respectivo óptimo. Algumas técnicas utilizadas na identificação destas regiões são:

- Função de aglomeração (Lin, Liou e Yang, 1998) – desta função resulta um valor para cada indivíduo que representa a medida do grau de aglomeração de indivíduos à sua volta. A partir destes valores são determinados candidatos a centros de nichos e calculados os respectivos raios de nicho;
- Técnica de distribuição em frequência (Thorp e Pierson, 1998) – esta técnica consiste no agrupamento dos indivíduos da população em intervalos, através de uma ordenação destes pelos valores das variáveis de decisão. Os indivíduos da população inseridos em cada um dos intervalos de uma variável são encarados como sub-populações. Para cada uma destas sub-populações, é calculada a média e o desvio padrão a fim de determinar se os indivíduos estão suficientemente próximos uns dos outros de modo a formarem um nicho. Depois, a sub-população presente em cada um dos intervalos da variável é ordenada de novo em intervalos, de acordo com os valores de outra variável de decisão. Realiza-se de novo o teste anterior para a verificação da existência de nichos. Este processo continua até que todos os intervalos e respectivas subpopulações tenham sido estabelecidos para todas as variáveis. No final, estão identificados vários nichos;
- Técnica da comunidade (Thorp e Pierson, 1998) – consiste em determinar quais os indivíduos da população que possuem um elevado número de vizinhos e que estão separados por uma distância significativa de outros indivíduos que também têm muitos vizinhos. Esta é uma técnica baseada no cálculo de distâncias entre pontos e na definição de hiperesferas ou hipercubos.

4.4. Optimização multi-objectivo usando AGs

Num problema multi-objectivo pretende-se identificar uma frente de soluções não dominadas e os AGs trabalham com uma população de soluções resultantes da combinação entre a informação de todas as funções objectivo. Usualmente, são

utilizadas três abordagens típicas de combinação de informação entre funções objectivo, (Coello et al., 2002) e (Deb, 2001):

- abordagens onde se utilizam funções agregadoras;
- abordagens baseadas na optimalidades de Pareto;
- abordagens baseadas na ordenação dos indivíduos.

A primeira abordagem consiste na transformação do problema multi-objectivo num problema escalar através da agregação dos objectivos, usando coeficientes de ponderação ou construindo uma função escalar para minimizar uma distância a um ponto de referência.

A segunda abordagem consiste na minimização das dificuldades impostas pela parametrização da abordagem anterior (agregação de funções) tratando as funções objectivo individualmente. A primeira abordagem deste tipo denominada VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) foi proposta por Schaffer (1985). Para avaliar cada objectivo separadamente, a população é sub-dividida em sub-populações constituída por indivíduos escolhidos da população em estudo, sendo cada uma destas avaliada de acordo com uma dada função objectivo. Estas sub-populações são posteriormente combinadas através do cruzamento e mutação.
Um dos problemas do VEGA é que não obtém boa diversidade nas soluções da Fronteira de Pareto, sendo apenas capaz de encontrar pontos com desempenhos extremos nas funções objectivo e não de escolher soluções de compromisso mais equilibradas (Horn et al., 1994).

A última abordagem referida foi desenvolvida por Goldberg (1989) e visa a ordenação dos indivíduos de acordo com o teste de não dominância. Têm sido propostos vários outros métodos baseados na optimalidade de Pareto tais como MOGA, SPEA, NPGA e NSGA (Deb, 2001).

Das três abordagens descritas, a última tende a ser mais aplicada, dadas as suas potencialidades (versatilidade e flexibilidade) perante os diferentes tipos de problemas.

4.4.1. Algoritmos evolucionários multi-objectivo

Nesta secção apresenta-se uma introdução aos algoritmos evolucionários multi-objectivo mais importantes, quer por razões históricas, quer pela popularidade que ganharam nos últimos anos.

4.4.1.1. MOGA (Muli-objective Genetic Algorithm)

O algoritmo MOGA, desenvolvido por Fonseca e Fleming (1993), foi o primeiro a dar ênfase ao conceito de dominância e à diversidade das soluções. Estes autores propuseram uma forma não convencional de atribuição do mérito aos indivíduos de uma população. O mérito de um indivíduo, ou seja, o seu *ranking* é igual ao número de indivíduos que o dominam acrescido de uma unidade. Todos os indivíduos com *ranking* 1 representam soluções não dominadas.

Para manter a diversidade entre soluções não dominadas, os autores propuseram usar nichos para cada *ranking*. Depois de obtidos os nichos é calculada a *aptidão partilhada* de cada solução de *ranking* 1, seguido das de *ranking* 2 e assim sucessivamente. O objectivo da *aptidão partilhada* é distribuir a população por toda a fronteira óptima de Pareto, como mostra a figura 4.9.

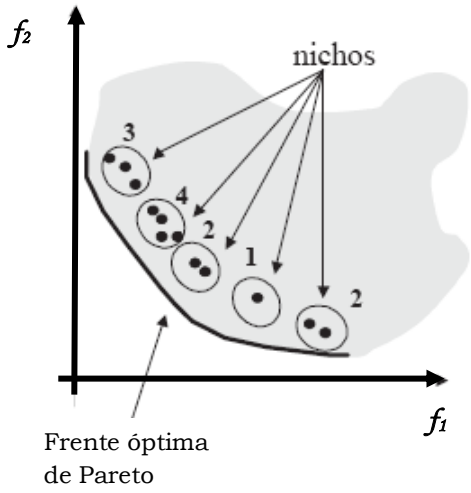

Figura 4.9 - Conjunto de soluções agrupadas em nichos (Deb, 2001).

Após a obtenção do raio do nicho, calcula-se a aptidão partilhada de cada solução. Desta forma, as soluções que estão dentro de cada nicho que apresente menor ocupação terão melhor *aptidão partilhada*. Assim sendo, serão destacadas as soluções menos representadas em cada *ranking* (Deb, 2001).

4.4.1.2. NPGA (Niched Pareto Genetic Algorithm)

O NPGA, proposto por Horn et al. (1994) baseia-se no conceito de não dominância, não sendo necessário o cálculo do desempenho para realçar as soluções não dominadas. Numa fase inicial, serve-se da selecção por torneio baseado na dominância; de seguida, é usada a partilha da medida de desempenho para escolher o vencedor (para o caso em que os indivíduos sejam não dominados).

Numa fase inicial (selecção por torneio), são escolhidas aleatoriamente para comparação duas soluções pertencentes a uma população e a uma sub-população. É calculado o nicho para a escolha da solução vencedora: indivíduo pertencente ao nicho com menos elementos, sempre que as duas soluções dominam a sub-população ou se pelo menos uma das soluções da sub-população domina as duas soluções inicialmente escolhidas aleatoriamente. Caso um dos indivíduos escolhidos inicialmente domine a sub-população e o outro indivíduo seja dominado por algum elemento da sub-população, então o primeiro indivíduo é o vencedor (Deb, 2001).

Assim, é assegurada a diversidade em toda a frente de Pareto. Sendo o número de soluções utilizadas na comparação responsável pelo controlo da convergência, se este grupo de soluções for demasiado grande podemos estar perante uma convergência prematura; caso o grupo seja demasiado pequeno, podemos estar perante poucos indivíduos não dominados.

4.4.1.3. NSGA (Non dominated Sorting Genetic Algorithm)

O NSGA proposto por Srinivas e Deb (1994) é um método similar ao MOGA. As principais diferenças encontram-se na forma como a função de avaliação é atribuída ao indivíduo e na estratégia de criação de nichos, evitando assim que a convergência seja deslocada para apenas uma região. Este algoritmo determina inicialmente o conjunto dos indivíduos não dominados numa população. De seguida, atribui a cada um desses indivíduos um valor de aptidão igual a N_P, onde N_P representa o número de indivíduos da população. Concluída esta fase é aplicada uma estratégia de *partilha* de modo a encontrar o *contador de nichos* de cada um destes indivíduos. Com os valores de função de avaliação inicialmente atribuído e o *contador de nichos* de cada indivíduo, obtém-se a *aptidão partilhada* de cada um destes indivíduos com os seus vizinhos. Guarda-se o menor valor de *aptidão*

partilhada, K. Ignoram-se os indivíduos anteriores e obtém-se a segunda frente de Pareto. O processo repete-se, só que agora a cada indivíduo não dominado escolhido é atribuído um valor que terá de ser menor do que a referência *K* anterior. O processo termina quando for encontrada a aptidão de todos os indivíduos. Este procedimento de atribuição da aptidão garante, por um lado, que a uma solução é sempre atribuído um valor de *aptidão partilhada* menor do que qualquer solução que a domine. Por outro lado, para cada conjunto de indivíduos não dominados cria maior diversidade.

Com o intuito de reduzir a complexidade computacional do algoritmo, surgiu uma nova abordagem, baseada num ordenamento elitista por não dominância, o NSGA II referida em Deb (2001). Numa primeira iteração, gera-se uma população P_0 que é ordenada por não dominância. Cada indivíduo possui um valor de desempenho igual ao nível de não dominância. De seguida, aplicando os operadores genéticos obtém-se a população descendente (nova geração). Combinam-se os progenitores com os descendentes e faz-se uma ordenação por não dominância. Desta forma surge a primeira frente não dominada, e o processo repete-se até se ter toda a população escolhida. Neste algoritmo é introduzido o método chamado de *distância ao aglomerado* (*crowding distance*). Este método tem como objectivo melhorar a diversidade; para tal, escolhe as soluções que apresentam maiores valores de distância, isto é, as mais isoladas. O cálculo desta distância é usado para se ter uma estimativa da densidade das soluções na vizinhança da solução *i*. Este valor é calculado através da *distância ao aglomerado* normalizada entre as soluções mais próximas da solução *i* em todos os objectivos. O valor da distância à solução *i* serve como estimativa do perímetro formado pelo cubóide (figura 4.10) usando os vizinhos, um de cada lado, mais próximos como vértices.

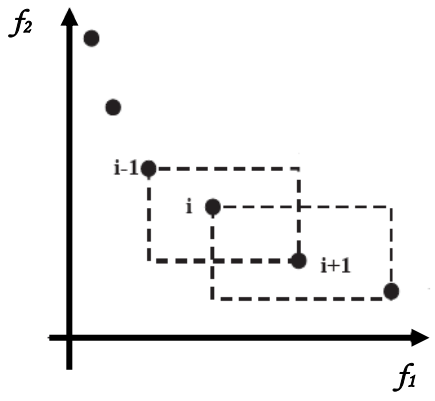

Figura 4.10 – **"**Distância ao aglomerado" (Deb, 2001).

Se uma frente tiver um tamanho superior ao da população inicial, o processo de escolher apenas *N* soluções usando a *distância ao aglomerado* faz com sejam perdidas soluções. Usando como referência a figura 4.11 podemos ver que em a) temos uma frente constituída por soluções não dominadas onde uma delas é não Pareto óptima a uma certa distância das demais Pareto óptimas. Dado que a *distância ao aglomerado* à solução não Pareto óptima é a maior, esta é copiada enquanto que a Pareto óptima é eliminada b). Isto faz com que o NSGA-II possa cair num ciclo vicioso, gerando soluções Pareto óptimas e não óptimas, até convergir finalmente num conjunto de soluções Pareto óptimas (Deb, 2001).

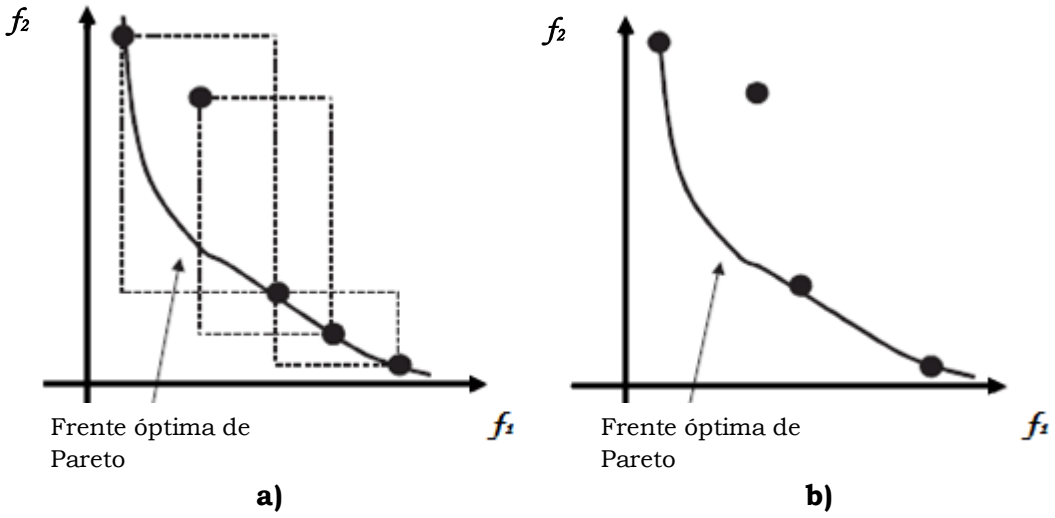

Figura 4.11 – Caso exemplificativo em que o algoritmo NSGA II pode gerar soluções óptimas e não óptimas de Pareto (Deb, 2001).

Apesar desta situação, que se poderá apontar como uma desvantagem deste método, o NSGA-II assume como vantagem o modo como mantém a diversidade entre as soluções não dominadas.

4.4.1.4. SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm)

O SPEA é uma abordagem elitista proposta por Zitzler e Thiele (1998), que é caracterizada por armazenar num conjunto externo *P* todas as soluções não dominadas encontradas da primeira à última geração do algoritmo. Caso esse conjunto exceda o número máximo de indivíduos, é utilizado um algoritmo de *clustering* para reduzir o tamanho do conjunto.

A cada elemento dessa população externa é atribuído um valor de aptidão. A aptidão atribuída é calculada em duas fases. Numa primeira fase é atribuído a cada indivíduo um valor de *strength* (força) $s_i \in [0,1]$ que é proporcional ao número de indivíduos da população corrente que são dominados pelo indivíduo i (4.5).

$$s_i = \frac{n}{N+1} \tag{4.5}$$

onde n é o número de indivíduos da população corrente dominados por i, e N o número total de indivíduos da população. A aptidão de cada indivíduo i é equivalente ao seu s_i. Numa segunda fase, a aptidão de um indivíduo é atribuída através da soma da s_i de todos os indivíduos da população externa que o dominam acrescido de uma unidade.

Para evitar um aumento do tempo de resposta do algoritmo causado por grandes espaços de pesquisa (soma dos elementos da população corrente com os da extra e a sua participação na selecção), utilizam-se *clusters* para diminuir o número de soluções admissíveis armazenadas na população extra, sem que isto cause perda de diversidade.

4.4.1.5. PAES (Pareto Archived Evolution Strategy)

Knowles e Corne (2000) desenvolveram um algoritmo denominado de PAES, que usa uma estratégia evolucionária com elitismo onde estão presentes um progenitor e um descendente (1 + 1). Neste método, depois de uma solução ser escolhida aleatoriamente, sofre uma mutação de acordo com uma função de distribuição normal com média zero. A melhor das duas soluções é transferida para a geração seguinte. A característica principal do algoritmo PAES incide no modo como o vencedor é escolhido. Na geração k, para além do progenitor p_k e do descendente d_k, o algoritmo guarda num arquivo as melhores soluções encontradas até ao momento. Quando as soluções p_k e d_k são comparadas resulta um dos dois cenários possíveis:

- Se apenas uma das soluções é não-dominada então esta é escolhida como vencedora;
- Se ambas as soluções forem não-dominadas então o descendente é comparado com o arquivo corrente, da seguinte forma:

- O descendente é dominado por uma solução do arquivo. Então é rejeitado e o progenitor sofre nova mutação;
- O descendente domina algumas soluções do arquivo. Então estas soluções são eliminadas e o descendente é arquivado, tornando-se no progenitor da geração seguinte;
- O descendente não é dominado pelo arquivo nem as soluções do arquivo dominam o descendente. O descendente apenas será adicionado ao arquivo se houver espaço para mais soluções. Neste caso, o progenitor da geração seguinte (entre o progenitor actual ou o seu descendente) será determinado através do número de soluções vizinhas sendo escolhida a solução que tiver menor número de vizinhos. Um processo alternativo consiste em dividir o espaço em hipercubos, de lado *l*. O hipercubo que contiver menos soluções determina o progenitor da geração seguinte. Para inserir uma solução remove-se a solução que pertencer ao hipercubo mais povoado (caso o descendente não pertencer a este). O parâmetro *l* é bastante importante no algoritmo pois controla directamente o volume do hipercubo.

4.4.2. Restrições

Dado que os AGs são essencialmente algoritmos de pesquisa sem restrições, torna-se necessário dotá-los de capacidade para lidar com soluções não admissíveis, o que acontece frequentemente nos problemas reais. Existem várias abordagens, que se enumeram de seguida, para incluir restrições nos AGs:

- *Eliminação das soluções não admissíveis*. Por um lado, a eliminação destas soluções logo que apareçam impede o uso da informação nelas contida (Michalewicz e Fogel, 2000). Por outro, se a pesquisa estiver numa região caracterizada por apresentar um mau desempenho dos indivíduos, no que diz respeito à admissibilidade, não lidar com as soluções não admissíveis pode dificultar o caminho para sair dessa região.
- *Introdução de penalizações na atribuição da medida de desempenho*. Esta técnica permite transformar um problema com restrições num sem restrições, sendo a penalização incluída na avaliação da função objectivo. A penalização permite a violação de restrições; no entanto, permite que essas soluções continuem a ser usadas. Pode fazer-se com que as soluções não admissíveis vejam a sua medida de desempenho degradada num certo valor

ou até que tenham sempre uma menor medida de desempenho do que as admissíveis, ao mesmo tempo que se permite o uso de informação útil que essas soluções possam conter. Por um lado, a penalização deve ser tal que garanta a separação das soluções admissíveis das não admissíveis, evitando que estas últimas se mantenham na população durante muito tempo. Por outro lado, não deve inibir o eventual uso de informação contida nas soluções não admissíveis.

- *Utilização de um operador reparação*. Para situações em que o grau de não admissibilidade é pequeno, este operador transforma as soluções não admissíveis em soluções admissíveis (Dowsland, 1996). No entanto, é necessário ter em atenção as relações entre os vectores no espaço das variáveis de decisão (fenótipo) e no espaço das populações (genótipo), isto é, que a solução resultante (reparada) não seja muito diferente da original.
- *Restringir o espaço de pesquisa apenas a soluções admissíveis*. Alguns tipos de restrições podem ser manipuladas, com recurso aos operadores mutação e cruzamento, de modo a minimizar a produção de soluções não admissíveis a partir de progenitores admissíveis (Fonseca e Fleming, 1998). Outra opção é a utilização de esquemas de representação fenótipo/genótipo que minimizem ou eliminem a possibilidade de produção de soluções não admissíveis pelos operadores genéticos (Michalewicz e Fogel, 2000).

A introdução de uma qualquer abordagem para o tratamento de restrições nos AGs implica, à partida, uma opção relativamente à melhor forma de o fazer no decurso do processo evolucionário e respectiva parametrização.

4.4.3. Estrutura de preferências do AD

Nos problemas multi-objectivo, o processo de selecção de uma solução de entre um conjunto de soluções não dominadas requer a intervenção da estrutura de preferências do AD. O próprio processo de pesquisa pode ser informado à priori dessas preferências e ser por elas orientado. A forma como se processa a incorporação das preferências na pesquisa origina uma classificação dos métodos de optimização multi-objectivo em métodos geradores, baseados em função valor/utilidade e interactivos (Antunes, 1991; Clímaco et al., 2003; Steuer, 1986).

Independentemente do momento em que é feita a articulação de preferências, esta permite a discriminação entre as soluções não dominadas. As preferências podem ser expressas, por exemplo:

- Pelos valores que o AD gostaria de ver atingidos em cada objectivo (níveis de aspiração);
- Pelos valores que limitam o espaço de soluções aceitáveis (níveis de reserva);
- Pela atribuição de um ordenamento dos diferentes objectivos (abordagem lexicográfica);
- Através da identificação de coeficientes de ponderação que permitem a agregação, temporária ou não, dos objectivos;
- Especificação de taxas marginais de substituição entre as funções objectivo.

Em geral, o conhecimento do AD acerca do espaço de pesquisa não é suficiente para lhe permitir indicar regiões potencialmente atraentes. Contudo, o processo de pesquisa beneficia se puder ter um comportamento orientado. Referem-se em seguida algumas abordagens onde as preferências do AD são incorporadas no processo de pesquisa:

- Em Fonseca e Fleming (1993) é descrita uma implementação do algoritmo MOGA, em que o método de atribuição da medida de desempenho é combinado com a articulação progressiva de preferências do AD, minimizando a distância a um ponto de referência. Indivíduos na mesma ordem de mérito são diferenciados, penalizando as dimensões em que os níveis de aspiração já foram atingidos. Estes níveis de aspiração são fornecidos interactivamente pelo AD, em cada geração do AG, reduzindo o esforço de cálculo quando comparado com a caracterização exaustiva da frente não dominada. Esta interactividade permite que o AD dirija a pesquisa para uma dada região do espaço.
- Coello et al. (2002) permitem que o processo de cálculo leve em conta o facto de os indivíduos satisfazerem ou não os níveis de aspiração identificados pelo AD, tentando determinar soluções que estejam perto do ponto de referência definido pelos níveis de aspiração.
- Branke et al. (2001) não exigem que o AD estabeleça preferências rígidas para os diferentes objectivos, permitindo antes que indiquem algumas relações de compromisso, no caso valores máximos e mínimos de uma

função que agrega os objectivos. A formulação baseia-se na especificação de taxas marginais de substituição entre duas funções objectivo, tornando-se a sua aplicação mais difícil à medida que o número de funções objectivo aumenta.

4.4.4. Métricas de desempenho

Nos métodos multi-objectivo que usam AGs são muitas vezes requeridas métricas para avaliar o desempenho das soluções geradas. Estas métricas são de dois tipos: um corresponde à avaliação de cada solução através da atribuição de um valor da medida de desempenho, que já foi tratado em 4.3.4; o outro corresponde à avaliação/comparação dos resultados obtidos por diferentes métodos de optimização. Para o caso da optimização multi-objectivo, medir a qualidade dos resultados é mais complexo do que no caso de optimização mono-objectivo.

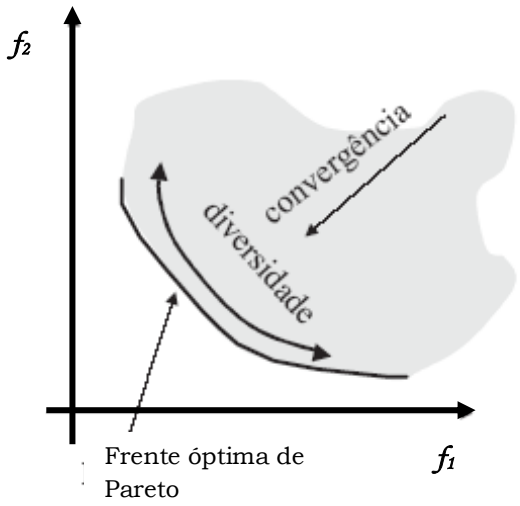

Figura 4.12 – As duas metas da optimização multi-objectivo (Deb, 2001)

Num problema de optimização multi-objectivo pretende-se encontrar soluções próximas da Frente Óptima de Pareto (convergência), apresentando uma boa diversidade ao longo da frente (figura 4.12). No entanto, e devido à natureza deste tipo de problemas, a convergência e a diversidade estão muitas vezes em conflito (Deb, 2001). A figura 4.13 a) ilustra um exemplo onde os resultados do algoritmo *A* apresentam boa convergência e pouca diversidade, ao contrário dos resultados do algoritmo *B* (figura 4.13 b)). Desta situação podemos concluir que nenhuma das frentes obtidas apresenta superioridade em relação aos critérios de convergência e

diversidade, sendo necessário considerar ambas as métricas para avaliar a qualidade dos resultados obtidos.

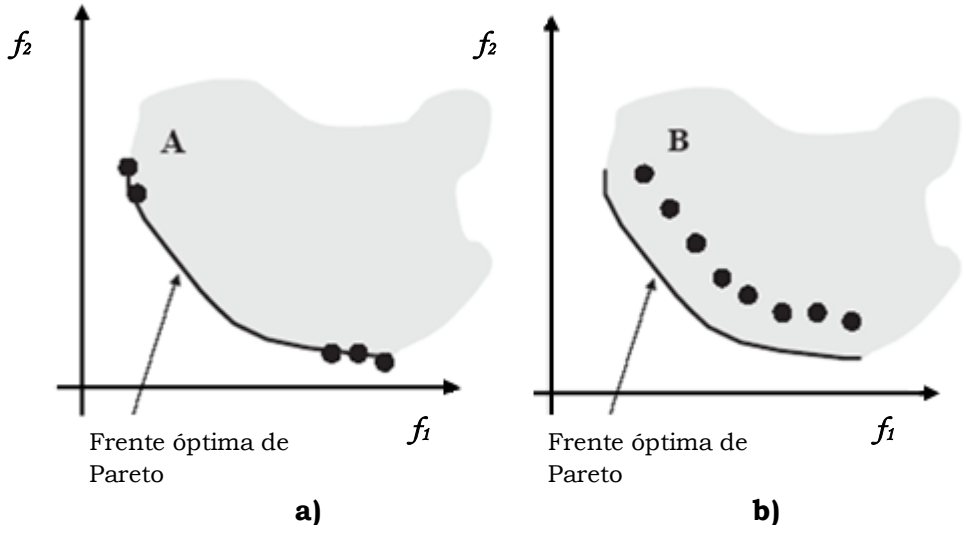

Figura 4.13 – Diversidade e convergência na Frente de Pareto (Deb, 2001).

A figura 4.14 ilustra outra situação. No primeiro caso (figura 4.14 a)) o algoritmo *A* é melhor do que o *B*. No segundo (figura 4.14 b)) é difícil determinar que algoritmo tem melhor desempenho. A comparação entre algoritmos dependerá muito da métrica utilizada.

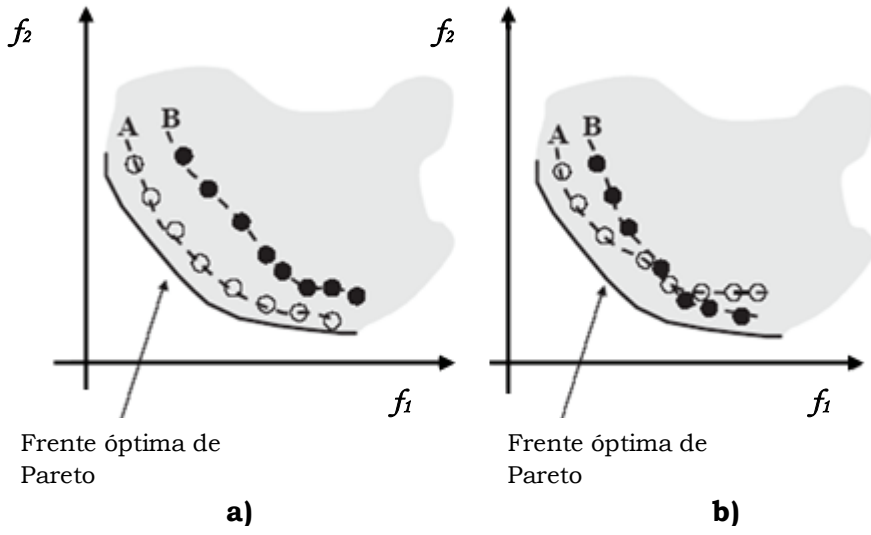

Figura 4.14 - Diversidade e convergência na Frente de Pareto. (Deb, 2001)

De seguida serão apresentadas, de forma muito sucinta, algumas das métricas referenciadas na literatura (Deb, 2001; Zitzler et al., 2000) para avaliar a diversidade e a convergência.

4.4.4.1. Métricas de Diversidade

Estas métricas são utilizadas para calcular a distribuição das soluções pela frente de Pareto.

- Para medir o espalhamento, calcula-se o desvio padrão entre as distâncias de soluções consecutivas. $S = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\bar{d} - d_i)^2}$, onde N é o número de soluções em análise, d_i é a distância da solução i ao ponto mais próximo e $\bar{d}$ é a médias dos valores d_i. A distribuição será tanto melhor quanto menor for o valor de S.
- Para calcular o número de nichos dentro de um conjunto Q constituído por N soluções, usa-se a seguinte expressão, $NC = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left| j \in Q, tal\ que\ d_{ij} > \sigma \right|$, onde d_{ij} é a distância entre as soluções i e j de Q; sempre que $d_{ij} < \sigma$ significa que ambas as soluções estão dentro do mesmo nicho. O valor de NC é um indicador da distribuição das soluções, representando o número de soluções cuja distância entre elas é maior do que σ. Quanto maior NC, melhor é a distribuição das soluções (Zitzler et al., 2000).

4.4.4.2. Métricas de Convergência

Estas métricas calculam a distância de um determinado conjunto de soluções a um conjunto de soluções óptimas de Pareto conhecidas.

- O *Quociente de erro* é uma métrica que faz a contagem das soluções que não pertencem ao conjunto de soluções óptimas de Pareto. $E = \frac{\sum_{i=1}^{N} e_i}{N}$, onde N é o número de soluções em análise e e_i indica se o ponto i pertence ou não à frente óptima de Pareto. Quanto menor o valor de E, melhor será a convergência. Caso E seja zero, significa que o conjunto de soluções pertence todo à frente óptima de Pareto (Veldhuizen, 1999).

- O *Set Coverage Metric* tem um comportamento similar à métrica anterior. No entanto, pode também ser utilizado de modo a dar uma ideia da dispersão entre dois conjuntos de soluções *A* e *B*, calculando a proporção de soluções de *B* que são fracamente dominadas pelas soluções de *A* (Zitzler et al., 2000).

$$C(A,B) = \frac{\left|b \in B, \, tal \; que \; \exists a \in A \; e \; a \leq b\right|}{\left|B\right|} \tag{4.13}$$

C(A,B) (4.13) pode assumir valores entre 1 e 0. Quando for 1, significa que todas as soluções de *B* são fracamente dominadas por soluções de *A*. Se for 0, nenhuma solução de *B* é fracamente dominada pelas soluções em *A*. Sendo o operador de dominância não simétrico, *C(A,B)* não tem que ser necessariamente igual a *C(B,A)*. Assim, é importante calcular ambos os valores para saber quem mais domina.

- A *Distância Geracional* (4.14) é a distância média entre um conjunto de soluções e o conjunto de soluções óptimas de Pareto (Veldhuizen, 1999).

$$D_G = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N} d_i^{\,p}\right)^{1/p}}{N} \tag{4.14}$$

onde d_i (para p=2) representa a distância Euclideana no espaço dos objectivos entre a solução *i* e o elemento mais próximo do conjunto de soluções óptimas de Pareto. A qualidade do conjunto de elementos da população depende do valor D_G obtido. Quanto menor for D_G, melhor.

- A métrica *MPFE* (*Maximum Pareto Front Error*) calcula a máxima das mínimas distâncias entre uma das soluções do conjunto em análise e o ponto mais próximo na frente óptima de Pareto. Nesta métrica, a obtenção da frente apenas tem em conta a pior das distâncias de entre todas as componentes, isto é, uma frente com um menor valor não é sinónimo de representar a melhor frente (Veldhuizen, 1999).

- *O Espalhamento Máximo* (4.15) é uma métrica que dá a extensão máxima das soluções em *Q*.

$$M\varepsilon = \sqrt{\sum_{m=1}^{P} (\max_{i=1}^{|Q|} f_m^i - \min_{i=1}^{|Q|} f_m^i)^2} \tag{4.15}$$

Onde f_m^i é o valor da função objectivo m na solução i e P representa o número de funções objectivo. Um maior valor para $M\varepsilon$ significa uma melhor cobertura do espaço (dos objectivos).

Todas estas métricas, entre outras, têm como finalidade a avaliação relativa do desempenho entre os diversos algoritmos. A utilização destas métricas serve também como forma de afinar parâmetros e para identificar uma condição de paragem, dependendo dos algoritmos e da natureza da aplicação.

4. 5. Robustez em Problemas Multi-Objectivo

O estudo de problemas de optimização multi-objectivo envolve a caracterização de um conjunto de soluções não dominadas, através do processamento quer de todas estas soluções, quer de uma amostra representativa. No entanto, algumas destas soluções, podendo ser vistas pelo AD como soluções de compromisso aceitáveis, no sentido em que representam um equilíbrio satisfatório entre os eixos de avaliação operacionalizados através das funções objectivo, podem ser muito sensíveis a perturbações. Isto é, quando uma dada solução não dominada, seleccionada por uma qualquer abordagem, é implementada na prática, pequenas variações nos valores das variáveis de decisão podem levar a uma degradação acentuada nos valores das funções objectivo. Por conseguinte, os algoritmos devem ser orientados para a obtenção de soluções robustas, isto é, soluções que sejam relativamente "insensíveis" a perturbações no espaço das variáveis de decisão. A robustez encontra-se intimamente ligada à incerteza que envolve os problemas reais (Barrico e Antunes, 2007).

O conceito de robustez não é unânime para todos os investigadores. Branke (1998) sugere algumas heurísticas para a obtenção de soluções robustas. Branke (2000) aponta algumas diferenças chave entre a pesquisa de soluções óptimas em modelos multi-objectivo e a pesquisa de soluções robustas. Jin e Sendhoff (2003) consideram uma abordagem para pesquisa de soluções robustas em optimização mono-objectivo e em problemas de optimização bi-objectivo, nas quais os objectivos a maximizar são a robustez e o desempenho relacionado com a função original. Nas

abordagens apresentadas por Kouvelis e Yu (1997), as soluções robustas são aquelas cujos valores são os melhores no pior cenário, podendo o pior cenário ser definido de várias formas. Neste contexto, foram definidas três medidas de robustez para definir o pior cenário: uma baseada no critério *min-max absoluto* (robustez absoluta) e duas outras baseadas no critério *min-max regret* (desvio robusto e robustez relativa). Lim et al. (2005) apresentam uma abordagem evolucionária que trata a incerteza tendo em conta uma determinada robustez desejada, designada por robustez inversa, a partir da qual são escolhidas as soluções que garantam um certo grau de incerteza e que ao mesmo tempo satisfaçam o desempenho nominal da solução final.

São de referir também algumas das contribuições onde a robustez se encontra implícita na optimização multi-objectivo. Hughes (2001) introduziu o conceito de erro esperado a ser utilizado na dominância determinística de Pareto que depende do "ruído", perturbação nos dados associados às funções objectivo. Teich (2001) desenvolveu algumas técnicas de exploração espacial baseadas no critério de dominância de Pareto para casos onde uma ou mais das funções objectivo se encontram sujeitas a incerteza definida por intervalos. Li et al. (2005) apresentam um AG robusto (RMOGA) para estudar a relação entre o desempenho das soluções e a sua robustez, considerando duas funções objectivo, a medida de desempenho e o índice de robustez. Deb e Gupta (2004, 2005) apresentaram duas abordagens para determinar soluções robustas em problemas de optimização multi-objectivo. A primeira consiste em optimizar as funções objectivo efectivas médias, as quais são calculadas através da média de um conjunto representativo de soluções vizinhas. A segunda consiste em optimizar as funções objectivo originais, mas considerando uma restrição para limitar as alterações nos valores das funções objectivo a um valor definido pelo AD. Barrico e Antunes (2006, 2006a) apresentam algumas abordagens que utilizam o conceito de grau de robustez, que se baseia no comportamento das soluções nas suas vizinhanças no espaço das variáveis de decisão. O conceito de grau de robustez é também utilizado relativamente ao comportamento das soluções nas suas vizinhanças do cenário de referência no espaço das funções objectivo. Esta abordagem será a que iremos utilizar neste trabalho.

O conceito de grau de robustez permite ao AD controlar os níveis desejados ou aceitáveis do nível de robustez das soluções obtidas. O AD pode especificar a dimensão da vizinhança da solução, quer no espaço das variáveis de decisão, quer no espaço das funções objectivo (Barrico e Antunes, 2007). O conceito de grau de robustez é embebido no processo evolucionário, particularmente no cálculo da aptidão de cada indivíduo. Desta forma, a evolução das soluções determinadas pelo processo evolucionário dá origem a soluções mais robustas, isto é, soluções em que as funções objectivo são mais imunes a perturbações dos valores das variáveis de decisão.

4.5.1. Grau de Robustez

As definições convencionais de robustez permitem classificar as soluções apenas como robustas ou não-robustas. No entanto, o que distingue uma solução robusta de uma não-robusta pode ser "insignificante" dada a sua proximidade. Por outro lado, uma solução pode ser mais robusta do que outra e, no entanto, a que apresenta menor robustez pode ser considerada pelo AD como "mais interessante", face a outra que apresenta melhor valor de robustez, dado que para o AD o que interessa são os valores que apresentam para as funções objectivo.

Estas definições de robustez podem ser usadas na construção de abordagens evolucionárias para problemas sujeitos a incerteza (perturbações), quer nos valores das variáveis de decisão, quer nos dados (coeficientes e parâmetros) associados às restrições e às funções objectivo do problema em estudo. O problema é modelado deterministicamente (através dos dados "nominais" associados ao problema), sendo as perturbações adicionadas às respectivas entidades do modelo no decorrer do processo evolucionário, aquando de cálculo dos graus de robustez das soluções.
Para avaliar a robustez das soluções de um problema em que os dados associados às restrições e às funções objectivo estão sujeitas a perturbações, é necessário introduzir o conceito de cenário. Um *cenário* é um conjunto de valores possíveis para os dados do problema sujeitos a perturbações. Ao conjunto dos valores iniciais (nominais) para estes dados dá-se o nome de *cenário de referência*. Designa-se por *espaço dos cenários* o conjunto de todos os cenários possíveis (Barrico e Antunes, 2007).
Dado que em qualquer dimensão do espaço das soluções ($x_1, x_2, \ldots, x_n$), estas podem estar sujeitas a perturbações, o grau de robustez de uma solução x está dependente

do comportamento das soluções que se encontram na sua vizinhança, num dado raio δ, no espaço das soluções e no espaço dos objectivos. O cálculo do grau de robustez de uma solução *x* é realizado da seguinte forma:

- Inicialmente são analisadas h soluções geradas aleatoriamente pertencentes à δ-vizinhança da solução *x*.
- Procede-se progressivamente ao alargamento das vizinhanças em múltiplos de δ (δ, 2δ, ...), até que seja satisfeita pelo menos uma das seguintes condições:
  - a percentagem das h soluções que são admissíveis seja inferior a um limiar predefinido, ou;
  - os valores de todas as soluções confinadas pela (*k*δ) vizinhança cujos valores das funções objectivo sejam melhores do que f(*x*), ou pertencem a uma vizinhança de raio η em redor de f(*x*) inferior a um outro limiar predefinido.
- O grau de robustez da solução *x* é igual ao número de vizinhanças de raios múltiplos de δ.

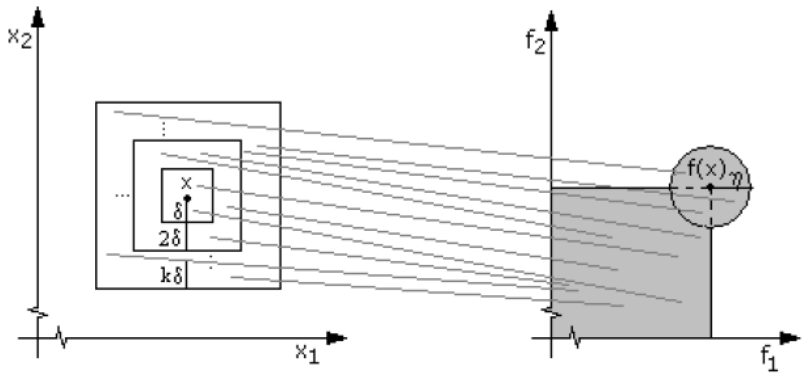

Figura 4.15 - Definições das vizinhanças nos espaços das variáveis de decisão e das funções objectivo (para espaços bidimensionais e todas as funções a minimizar), Barrico e Antunes (2007).

O grau de robustez uma solução *x* define-se como um valor inteiro positivo *k*, tal que (Figura 4.15):

a) a percentagem de soluções admissíveis da *k*δ-vizinhança de *x,* cujos valores das funções objectivo são todas melhores do que f(x) ou pertençam à η-vizinhança de f(x), é maior ou igual a um limiar predefinido p;

b) a percentagem de soluções admissíveis da $(k+1)\delta$-vizinhança de x, cujos valores das funções objectivo são todas melhores do que f(x) ou pertençam à η-vizinhança de f(x), é inferior a p.

Os parâmetros (p e η) estão associados ao nível de exigência da robustez, o qual é especificado pelo AD. O parâmetro p pode ser entendido como um indicador da robustez requerida. O parâmetro η é usado como limite superior para a distância não normalizada absoluta entre os valores das funções objectivo de uma solução (de qualquer tipo) no espaço dos objectivos.

O grau de robustez contribui para a avaliação das soluções permitindo classificá-las de acordo com o seu grau de robustez, tendo em conta variações nos valores das variáveis de decisão. Para mais detalhes ver Barrico e Antunes (2006, 2006a, 2007).

5. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM AG PARA A LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE GD, BCS E DRA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM BASE NUM MODELO MULTI-OBJECTIVO

Neste capítulo descreve-se a implementação de um AG para a localização e dimensionamento de unidades de GD e BCs, assim como a localização de DRA em redes de distribuição, com base num modelo multi-objectivo. Começa por se apresentar o modelo matemático, que inclui duas funções objectivo, justificando o interesse da sua consideração como eixos de avaliação fundamental do mérito das soluções, bem como a relevância e utilidade do modelo. Faz-se depois uma breve apresentação do problema em estudo e de algumas das suas características, nomeadamente as respeitantes ao espaço de pesquisa. De seguida, descreve-se a implementação do AG, sendo apresentadas as várias fases desse processo. São, nomeadamente, expostas algumas das características próprias do algoritmo, como sejam a utilização do conceito de dominância, a incorporação do conceito de robustez, a forma de cálculo da medida de desempenho, e a forma de comportamento elitista implementada.

5.1. Introdução

No sector eléctrico, mesmo num cenário de reestruturação, o planeamento da expansão da capacidade de produção recorrendo a unidades GD é ainda um assunto relevante, sobretudo motivado por objectivos de natureza económica. Os potenciais interessados na instalação de GD na rede de distribuição são, por exemplo, uma distribuidora com funções de comercialização e que pretenda adoptar o modelo VPP, um investidor em tecnologias GD, um comercializador, um fornecedor, e a concessionária da própria rede. No caso particular das distribuidoras com função de comercialização, existem ainda questões que se

prendem com eventuais restrições locais em termos de capacidade (evitando o reforço prematuro da rede), relacionadas com a continuidade de serviço (minimizando os efeitos da energia não distribuída aos consumidores por motivos de falha de elementos do sistema), ou ainda relacionadas com medidas de índole ambiental ou outra que possam ser estimuladas por regulamentação. Para os distribuidores que pretendem, em simultâneo, estar preparados para adoptar o modelo VPP, existem ainda questões que se prendem com eventuais restrições tecnológicas, protocolos de comunicação que permitam que as várias unidades GD se comportem como unidades auto-reguladas, ou seja, se comportem como sendo indistinguíveis de qualquer outra instalação de utilização de energia.

A selecção e localização de GD, BCs e DRA requer, por um lado, que as unidades GD, as BCs e os DRA sejam seleccionados tendo subjacente um compromisso entre vários objectivos de natureza económica e técnica e, por outro, que sobre cargas de um mesmo grupo[2] sejam aplicadas acções de corte (deslastre), no caso de uma avaria, de modo a mitigar as perturbações (criando "ilhas" ou zonas). Assim, para além da selecção de tecnologias e localizações das unidades GD, BCs e DRA, são necessárias a identificação e a arrumação das cargas em grupos de prioridade, de acordo com os objectivos do modelo e a informação sobre as preferências de um AD.

A pesquisa de soluções reveste-se de alguma complexidade, devido à sua natureza combinatória originada pela possibilidade de combinação de diferentes localizações das tecnologias GD, BCs e DRA na rede, com o consequente aumento do espaço de pesquisa, e à necessidade de estabelecer compromissos entre as diferentes funções objectivo. A possibilidade de, na presença de avarias, ter em conta o funcionamento em "ilhas" bem delimitadas pelos aparelhos de corte e a necessidade de estabelecimento de acções de deslastre de carga caso a potência das tecnologias GD nessas zonas seja inferior à procura, torna o problema ainda mais complexo. Daqui decorre a utilidade de ferramentas que auxiliem a identificação de soluções de compromisso entre as várias funções objectivo, envolvendo um esforço computacional aceitável.

[2] *Significa que as cargas de uma dada rede em estudo serão agrupadas segundo as suas prioridades. Isto é, as cargas são agrupadas pelas suas necessidades em termos de continuidade de serviço. Por exº., cargas com prioridade 1 (hospitais,..) pertencem ao grupo 1,…. Assim, em caso de avaria num troço da rede e necessidade de funcionamento em "ilha", pode dar-se ordem de deslastre a cargas/ grupos de cargas menos prioritárias dessa mesma "ilha", no caso de a procura ser maior que a oferta.*

Os AGs prestam-se a este tipo de problemas combinatórios com múltiplas funções objectivo, devido a lidarem em cada geração com um conjunto de potenciais soluções, sendo possível apresentar ao AD um conjunto de "representantes" de diferentes zonas do espaço de pesquisa com diferentes características e diferentes compromissos entre as funções objectivo. Na presença deste conjunto de soluções, incomparáveis apenas com base na relação de não dominância, o AD deve ser chamado a fazer intervir a sua estrutura de preferências na escolha de uma solução de compromisso. Nestas circunstâncias, os algoritmos devem, para além da convergência para a fronteira não dominada, garantir a diversidade destas soluções de modo a caracterizar o mais amplamente possível o seu universo e dotar o decisor de informação sobre os compromissos entre funções objectivo em diferentes regiões da fronteira. O desempenho dos AGs tem vindo a revelar-se cada vez mais eficiente, quer em termos de capacidade de pesquisa, quer no que se refere à manutenção de diversidade, no sentido de uma caracterização o mais efectiva possível de toda a frente de soluções não-dominadas em modelos multi-objectivo como base para apoio à tomada de decisões. Os AGs necessitam ser adaptados ao problema em estudo através da calibração de um conjunto de parâmetros relativos aos operadores selecção, cruzamento e mutação. Esta necessidade de adaptação ao problema começa com a codificação dos indivíduos da população para representar soluções, passando pela concepção e parametrização dos operadores utilizados no decurso da simulação do processo de evolução.

A instalação de unidades GD, BCs e DRA proporciona, por um lado, o aumento da capacidade do sistema por libertação de capacidade de geração centralizada, de transmissão e de distribuição dos alimentadores e aparelhagem associada e, por outro lado, a melhoria dos indicadores de continuidade de serviço do sistema[3].

A estes indicadores estão associados a deslastres de cargas, no caso de avarias, em zonas sem GD e o deslastre total ou parcial (cargas menos prioritárias) em zonas com GD sempre que a procura seja maior que a oferta.

Como podem ser diversos os potenciais interessados em instalar GD nas redes de distribuição, este modelo de apoio à decisão está essencialmente vocacionado para ser utilizado por uma entidade responsável pela regulamentação e planeamento de

[3] Os indicadores normalmente utilizados são o System Average Interruption Frequency Index (SAIFI), System Average Interruption Duration Index (SAIDI) e o Momentary Average Interruption Frequency Index (MAIFI).

redes de distribuição, em termos de localização e dimensionamento de unidades GD e eventualmente para usar em modo de licitação de investimentos. Assim, este modelo pode ser utilizado nos mais diversos cenários em termos de integração de actividades, desde a estrutura mais tradicional – integrada verticalmente - até ao completo desmembramento (devido à desregulamentação do sector).

5.2. Modelo Multi-objectivo

Como eixos de avaliação do mérito de soluções alternativas consideram-se a minimização das perdas na rede e a minimização do investimento requerido. A "potência não fornecida" (PF) associada ao deslastre de cargas no caso de avarias é incluída como um atributo definido à posteriori para cada solução. Ao englobar este conjunto de objectivos, o modelo será, assim, potencialmente útil para diversas entidades envolvidas, fundamentalmente à gestora/concessionária da rede /distribuidora.

- **Minimizar o investimento associado à instalação de GD, BCs e DRA**. Este é, em princípio, um dos objectivos que será comum a qualquer decisor. Os custos de instalação de equipamentos (unidades GD, BCs e DRA) são calculados de acordo com dados recolhidos junto das empresas fornecedoras. Nestes custos são contemplados os custos do equipamento, os custos de instalação, os custos de operação e manutenção, todos os custos prévios de projecto e impacto ambiental assim como os custos de desmantelamento no final de vida útil. Esta função objectivo interessa à distribuidora/entidade gestora da rede, uma vez que minimiza os custos de investimento em expansão de rede, e ao investidor em tecnologias GD.

- **Minimização das perdas do sistema**. A redução das perdas nas redes passa pela redução do trânsito de potência proveniente da produção centralizada. A instalação de pequenos centros produtores estrategicamente localizados na rede permite que a injecção de potência (activa e reactiva) seja feita de forma dispersa, evitando ou atrasando a necessidade de instalação de novos equipamentos destinados a reforçar a capacidade da rede. Muito embora, de uma maneira geral, as empresas distribuidoras não possuam qualquer controlo sobre as unidades GD, uma vez que estas serão geralmente de propriedade particular, deverão

possuir metodologias que permitam avaliar o seu efeito sobre as perdas, quer para poderem proceder à instalação de unidades de sua propriedade, quer para poderem negociar mais eficazmente a atribuição de pontos de interligação (desde que a legislação em vigor o permita). O cálculo das perdas interessa também ao comercializador se as tarifas incluírem uma parcela de perdas e à distribuidora que vê estes custos serem reduzidos.

5.2.1. Nomenclatura

Para a formulação matemática do modelo utilizou-se a seguinte nomenclatura:

m – índice que referencia os barramentos dos ramos laterais.

n – índice que referencia os ramos laterais.

z – índice que referencia a zona, composta por alimentadores, cargas, nós, GD e BCs existentes entre dois DRA.

l – índice que referencia os barramentos do alimentador principal.

j - índice que referencia uma tecnologia (tipo) de GD.

$j1$ - índice que referencia o tipo de BC.

i - índice que referencia o DRA utilizado.

C_j – Custo associado à tecnologia de geração dispersa j.

C_{j1} – Custo associado à bateria de condensadores do tipo $j1$.

C_i – Custo do DRA do tipo i.

B_{nm}^{l} - Barramento m do lateral n com origem no barramento principal l.

T_{nm}^{l} - Troço m do lateral n com origem no barramento principal l, que liga o barramento B_{nm}^{l} ao barramento seguinte $B_{n(m+1)}^{l}$.

N_{DRA} - Número de DRA a instalar na rede em cada solução.

r_{nm}^{l} - Valor da resistência do troço T_{nm}^{l}.

X_{nm}^{l} - Valor da reactância do troço T_{nm}^{l}.

V_{nm}^{l} – Valor da tensão no barramento m (lateral n que deriva do barramento principal l).

Pc_{nm}^{l} - Carga (potência activa) alimentada a partir do barramento m (lateral n que deriva do barramento principal l).

Qc_{nm}^{l} - Carga (potência reactiva) alimentada a partir do barramento *m* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*).

P_{nm}^{l} - Potência activa que flui do troço *m*, isto é, sai do barramento *m* para o barramento *m+1* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*).

Q_{nm}^{l} - Potência reactiva que flui do troço *m*, isto é, sai do barramento *m* para o barramento *m+1* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*).

$P_{G\,nm}^{\ l}$ - Potência activa injectada no barramento *m* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*).

$Q_{G\,nm}^{\ l}$ - Potência reactiva injectada no barramento *m* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*).

Pc_{nmz}^{l} - Carga (potência activa) alimentada a partir do barramento *m* (lateral *n* que deriva do barramento principal *l*) da zona *z*.

GD_{Pj} - Potência activa da tecnologia GD do tipo *j.*

GD_{Qj} - Potência reactiva associada à tecnologia GD do tipo *j* (tgφ=0,4).

BC_{j1} - Potência reactiva da bateria de condensadores *j1.*

$x_{j\,nm}^{\ l}$ - Variável binária que indica se a tecnologia GD_{Pj} é ou não instalada no barramento B_{nm}^{l}.

$xx_{j1\,nm}^{\ l}$ - Variável binária que indica se a bateria de condensadores BC_{j1} é ou não instalada no barramento B_{nm}^{l}.

$y_{i\,nm}^{\ l}$ - Variável binária que indica se o disjuntor remotamente accionado DRA_i é ou não instalado no barramento B_{nm}^{l}.

$yv_{z\,nm}^{\ l}$ - Variável binária que indica se existe ou não avaria no troço T_{nm}^{l} situado na zona z

a_{nmj}^{l} - Coeficiente binário que indica se é ou não possível instalar GD do tipo *j* no nó B_{nm}^{l}.

$$a_{nmj}^{l} = \begin{cases} 1, \textit{se é possível instaladar GD do tipo } j \textit{ em } B_{nm}^{l} \\ 0, \textit{caso contrário} \end{cases}$$

aa^{l}_{nmj1} - Coeficiente binário que indica se é ou não possível instalar BC do tipo *j1* no nó B^{l}_{nm}.

$$aa^{l}_{nmj1} = \begin{cases} 1, \textit{ se é possível instalar uma BC em } B^{l}_{nm} \\ 0, \textit{ caso contrário} \end{cases}$$

av^{l}_{nmi} - Coeficiente binário que indica se é ou não possível instalar DRA no nó B^{l}_{nm}.

$$av^{l}_{nmi} = \begin{cases} 1, \textit{ se é possível instaladar DRA em } B^{l}_{nm} \\ 0, \textit{ caso contrário} \end{cases}$$

5.2.2. Modelo Matemático

A função custo a minimizar (5.1) consiste em:

$$\min \sum_{l} \sum_{n} \sum_{m} \left[\sum_{j} C_j . x^{\ l}_{j\,nm} + \sum_{j1} C_{j1} . xx^{\ l}_{j1\,nm} + \sum_{i} C_i . y^{\ l}_{i\,nm} \right] \tag{5.1}$$

$$s.a. \sum_{j} x^{\ l}_{j\,nm} \leq 1 \,,\ \forall m, n, l \tag{5.2}$$

$$\sum_{j1} xx^{\ l}_{j1\,nm} \leq 1 \,,\ \forall m, n, l \tag{5.3}$$

$$\sum_{i} y^{\ l}_{i\,nm} \leq 1 \,,\ \forall m, n, l \tag{5.4}$$

As variáveis $x^{\ l}_{j\,nm}$ (5.5), $xx^{\ l}_{j1\,nm}$ (5.5a) e $y^{\ l}_{i\,nm}$ (5.5b) tomam o valor 1 no caso de existir um GD do tipo GD_{Pj}, uma BCs do tipo BC_{j1} e um *DRA* do tipo *i*, respectivamente, no barramento B^{l}_{nm}:

$$x^{\ l}_{j\,nm} = \begin{cases} 1, \textit{ se é instalada a tecnologia do tipo } GD_{Pj} \textit{ em } B^{l}_{nm} \\ 0, \textit{ caso contrário} \end{cases} \tag{5.5}$$

$$xx^{\ l}_{j1\,nm} = \begin{cases} 1, \textit{ se é instalada a BC do tipo } BC_{j1} \textit{ em } B^{l}_{nm} \\ 0, \textit{ caso contrário} \end{cases} \tag{5.5a}$$

$$y^{\ l}_{i\,nm} = \begin{cases} 1, \textit{ se é instalado o DRA em } B^{l}_{nm} \\ 0, \textit{ caso contrário} \end{cases}$$

(5.5b)

As restrições (5.2), (5.3) e (5.4) impõem que apenas pode ser instalada uma tecnologia GD, BCs e um DRA em cada nó.

Minimização das perdas activas do sistema (5.6) corresponde a:

$$\min \sum_{l} \sum_{n} \sum_{m} r_{nm}^{l} \frac{P_{nm}^{l^2} + Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}} \tag{5.6}$$

As perdas resistivas de uma rede (somatório das perdas de todos os ramos T_{nm}^{l}), sofrem alterações sempre que sejam modificados os valores das potências injectadas, variáveis $P_{G\,nm}^{\ l}$ e $Q_{G\,nm}^{\ l}$. As equações (5.7 a 5.10) estão associadas ao trânsito de potência em cada ramo de uma rede radial, situação mais comum das redes de distribuição Portuguesas.

As equações (5.7) e (5.8) garantem o cálculo da potência activa, no primeiro caso nos ramos laterais e no segundo caso no alimentador principal.

$$P_{n(m+1)}^{l} = P_{nm}^{l} - r_{nm}^{l} \frac{P_{nm}^{l^2} + Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}} - Pc_{n(m+1)}^{l} + P_{G\,n(m+1)}^{\ l}, \quad \forall\, n \neq 0, l \neq 0,\ m \neq 0 \tag{5.7}$$

$$P_{0(m+1)}^{0} = P_{0m}^{0} - r_{0m}^{0} \frac{P_{0m}^{0^2} + Q_{0m}^{0^2}}{V_{0m}^{0^2}} - Pc_{0(m+1)}^{0} - \sum_{n=1}^{N^{m+1}} P_{n0}^{(m+1)} + P_{G\,0(m+1)}^{\ 0}, \quad \forall m \neq 0 \tag{5.8}$$

O mesmo acontece para as equações (5.9) e (5.10), em que a primeira se destina a assegurar a condição de potência reactiva nos ramos laterais e a segunda no alimentador principal.

$$Q_{n(m+1)}^{l} = Q_{nm}^{l} - X_{\ nm}^{l} \frac{P_{nm}^{l^2} + Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}} - Qc_{n(m+1)}^{l} + Q_{G\,n(m+1)}^{\ l}, \quad \forall\, n \neq 0, l \neq 0,\ m \neq 0 \tag{5.9}$$

$$Q_{0(m+1)}^{0} = Q_{0m}^{0} - X_{\ 0m}^{0} \frac{P_{0m}^{0^2} + Q_{0m}^{0^2}}{V_{0m}^{0^2}} - Qc_{0(m+1)}^{0} - \sum_{n=1}^{N^{m+1}} Q_{n0}^{(m+1)} + Q_{G\,0(m+1)}^{\ 0}, \quad \forall\, m \neq 0 \tag{5.10}$$

A equação (5.11) é referente à tensão nos nós do sistema.

$$V_{n(m+1)}^{l^2} = V_{nm}^{l^2} - 2.\left(r_{nm}^{l}.P_{nm}^{l} + X_{\ nm}^{l}.Q_{nm}^{l}\right) + \left(r_{nm}^{l} + X_{\ nm}^{l}\right).\left(\frac{P_{nm}^{l^2} + Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}}\right), \quad \forall\, n \neq 0, l \neq 0,\ m \neq 0 \tag{5.11}$$

A condição (5.12) garante os limites técnicos legais da tensão em cada barramento $\left[V^{l}_{nm_{MIN}}, V^{l}_{nm_{MAX}}\right]$

$$V^{l}_{nm_{MIN}} \leq V^{l}_{nm} \leq V^{l}_{nm_{MAX}}, \forall\ m,n,l \tag{5.12}$$

As potências activa e reactiva a injectar, pelas tecnologias GD seleccionadas, assim como a potência reactiva a injectar pelas BCs, em cada barramento, são dadas pelas equações (5.13) e (5.14).

$$P^{l}_{G\,nm} = \sum_{j} x^{\ l}_{j\,nm}.GD_{Pj}\ \ \forall\ m,n,l \tag{5.13}$$

$$Q^{l}_{G\,nm} = \sum_{j} x^{\ l}_{j\,nm}.GD_{Qj} + \sum_{j1} xx^{\ l}_{j1_{nm}}.BC_{j1}\ \forall\ m,n,l \tag{5.14}$$

As restrições (5.15), (5.15a) e (5.15b) indicam se é ou não possível instalar os equipamentos (GD, BCs e DRA) de um determinado tipo (*j*, *j1* e *i*) no nó B^{l}_{nm} respectivamente. Se o coeficiente binário ($a^{l}_{nmj}, aa^{l}_{nmj1}$ e av^{l}_{nm}) afecto a cada equipamento for 0, a respectiva variável de decisão ($x^{\ l}_{j\,nm}, xx^{\ l}_{j1_{nm}}$ e $y^{\ l}_{i\,nm}$) é 0, o que significa que é proibido instalar a tecnologia (uma vez que existem nós onde, por razões físicas ou operacionais do sistema, não é possível instalar determinadas tecnologias GD, BCs ou DRA). Se o coeficiente binário ($a^{l}_{nmj}, aa^{l}_{nmj1}$ e av^{l}_{nm}) afecto a cada tecnologia for 1, a respectiva variável de decisão ($x^{\ l}_{j\,nm}, xx^{\ l}_{j1_{nm}}$ e $y^{\ l}_{i\,nm}$) pode assumir o valor 0 ou 1, o que significa que é permitido instalar a tecnologia.

$$x^{\ l}_{j\,nm} \leq a^{l}_{nmj} \quad \forall\ m,n,l,j \tag{5.15}$$

$$xx^{\ l}_{j1_{nm}} \leq aa^{l}_{nmj1} \quad \forall\ m,n,l,j1 \tag{5.15a}$$

$$y^{\ l}_{i\,nm} \leq av^{l}_{nmi} \quad \forall\ m,n,l,i \tag{5.15b}$$

A equação (5.16) é referente ao cálculo do número de DRA a instalar em cada solução.

$$N_{DRA} = \sum_{i,l,n,m} y^{l}_{inm} \tag{5.16}$$

As restrições (5.17) limitam o número de DRA a instalar na rede entre um valor mínimo e um valor máximo especificado $[N_{DRA_{Min}},\ N_{DRA_{Max}}]$.

$$N_{DRA_{Min}} \leq N_{DRA} \leq N_{DRA_{Max}} \tag{5.17}$$

O número e localização de DRA (associado às variáveis y_{inm}^{l}) é determinado externamente ao modelo por um processo aleatório, respeitando as restrições do modelo matemático.

O modelo matemático virá então:

$$\min \sum_{l}\sum_{n}\sum_{m}\left[\sum_{j} C_j.x_{j\,nm}^{\ l} + \sum_{j1} C_{j1}.xx_{j1_{nm}}^{\ l} + \sum_{i} C_i.y_{i\,nm}^{\ l}\right]$$

$$\min \sum_{l}\sum_{n}\sum_{m} r_{nm}^{l}\,\frac{P_{nm}^{l^2}+Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}}$$

s. a

$$\sum_{j} x_{j\,nm}^{\ l} \leq 1,\ \forall m,n,l$$

$$\sum_{j1} xx_{j1_{nm}}^{\ l} \leq 1,\ \forall m,n,l$$

$$\sum_{i} y_{i\,nm}^{\ l} \leq 1,\ \forall m,n,l$$

$$P_{n(m+1)}^{l} = P_{nm}^{l} - r_{nm}^{l}\,\frac{P_{nm}^{l^2}+Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}} - Pc_{n(m+1)}^{\ l} + P_{G\,n(m+1)}^{\ l},\quad \forall\ n\neq 0,\ l\neq 0,\ m\neq 0$$

$$P_{0(m+1)}^{0} = P_{0m}^{0} - r_{0m}^{0}\,\frac{P_{0m}^{0^2}+Q_{0m}^{0^2}}{V_{0m}^{0^2}} - Pc_{0(m+1)}^{0} - \sum_{n=1}^{N^{m+1}} P_{n0}^{(m+1)} + P_{G\,0(m+1)}^{\ 0},\quad \forall m\neq 0$$

$$Q_{n(m+1)}^{l} = Q_{nm}^{l} - X_{nm}^{\ l}\,\frac{P_{nm}^{l^2}+Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}} - Qc_{n(m+1)}^{l} + Q_{G\,n(m+1)}^{\ l},\quad \forall\ n\neq 0,\ l\neq 0,\ m\neq 0$$

$$Q_{0(m+1)}^{0} = Q_{0m}^{0} - X_{0m}^{\ 0}\,\frac{P_{0m}^{0^2}+Q_{0m}^{0^2}}{V_{0m}^{0^2}} - Qc_{0(m+1)}^{0} - \sum_{n=1}^{N^{m+1}} Q_{n0}^{(m+1)} + Q_{G\,0(m+1)}^{\ 0},\quad \forall\ m\neq 0$$

$$V_{n(m+1)}^{l^2} = V_{nm}^{l^2} - 2.\left(r_{nm}^{l}.P_{nm}^{l} + X_{nm}^{\ l}.Q_{nm}^{l}\right) + \left(r_{nm}^{l} + X_{nm}^{\ l}\right).\left(\frac{P_{nm}^{l^2}+Q_{nm}^{l^2}}{V_{nm}^{l^2}}\right),\quad \forall\ n\neq 0,\ l\neq 0,\ m\neq 0$$

$$P^{l}_{G\,nm} = \sum_{j} x^{\ l}_{j\,nm}.GD_{Pj} \ \forall\, m,n,l$$

$$Q^{l}_{G\,nm} = \sum_{j} x^{\ l}_{j\,nm}.GD_{Qj} + \sum_{j1} xx^{\ l}_{j1_{nm}}.BC_{j1} \ \forall\, m,n,l$$

$$N_{DRA} = \sum_{i,l,n,m} y^{l}_{inm}$$

$$x^{\ l}_{j\,nm} \le a^{l}_{nmj} \quad \forall\, m,n,l,j$$

$$xx^{\ l}_{j1_{nm}} \le aa^{l}_{nmj1} \quad \forall\, m,n,l,j1$$

$$y^{\ l}_{i\,nm} \le av^{l}_{nmi} \quad \forall\, m,n,l,i$$

$$V^{l}_{nm_{MIN}} \le V^{l}_{nm} \le V^{l}_{nm_{MAX}}, \forall\, m,n,l$$

$$N_{DRA_{Min}} \le N_{DRA} \le N_{DRA_{Max}}$$

$$x^{\ l}_{j\,nm} = 0\,ou\,1 \quad \forall\, m,n,l,j$$

$$xx^{\ l}_{j1_{nm}} = 0\,ou\,1 \quad \forall\, m,n,l,j1$$

$$y^{\ l}_{i\,nm} = 0\,ou\,1 \quad \forall\, m,n,l,i$$

Outras restrições podem ser impostas ao modelo, por exemplo, relacionadas com limiares aceitáveis em cada uma das funções objectivo de modo a limitar o âmbito da pesquisa a uma região que o AD considere adequada.

5.2.3. Cálculo do atributo "Potência Fornecida"

Para além das duas funções objectivo, custos e perdas activas, é utilizado um atributo adicional, "*Potência fornecida*" (PF), para ajudar o decisor na escolha. Este atributo é exterior ao modelo matemático acima apresentado (calculado à posteriori para a melhor frente obtida) e permite a avaliação das soluções quanto à continuidade de serviço. Este atributo resulta de um processo de geração de avarias, com base nas taxas de avarias registadas nos ramos das redes em estudo

(respeitando a informação contida nos coeficientes av_{nmi}^{l} que indicam a possibilidade de instalação de DRA num dado nó).

Após a localização dos DRA a rede passa a ser constituída por zonas. Cada zona é constituída por todos os componentes físicos (nós, ramos, cargas, GD e BCs) existentes entre dois DRA consecutivos. Em caso de avaria num local qualquer da rede, as zonas a jusante do defeito podem continuar a ser alimentadas individualmente caso possuam GD e que a potência destas seja maior ou igual à potência solicitada pela menor carga existente nessa zona. Ou seja, essas zonas alimentadas pelas suas próprias unidades GD funcionam temporariamente de forma isolada, formando "ilhas". O atributo PF representa a potência total pedida pelas cargas menos a potência que não é possível fornecer às mesmas devido à localização das avarias, tendo em conta as zonas definidas pela localização de DRA. Esta potência que não é possível fornecer é, face a uma delimitação das zonas definida pela localização de DRA, a soma de duas parcelas:

- a potência total das cargas em zonas que não têm qualquer unidade de GD instalada;
- a potência das cargas deslastradas em zonas onde existe pelo menos uma unidade de GD cuja potência é insuficiente para satisfazer toda a procura nessa zona.

5.3. Uma abordagem baseada em AG Multi-Objectivo

O problema da localização e selecção de tecnologias de produção de energia eléctrica de forma descentralizada, baterias de condensadores e disjuntores remotamente accionados em redes de distribuição consistirá em, para uma dada rede de distribuição radial, proceder à identificação dos barramentos mais apropriados para instalação do tipo e potência das tecnologias GD, BCs e DRA adequados aos objectivos em análise. Tratando-se de um problema de selecção e localização, devido à sua natureza combinatória o espaço de pesquisa poderá ser muito irregular em termos da localização e da frequência espacial das soluções.

O algoritmo a ser utilizado na resolução deste problema deverá ser capaz de, por um lado, conseguir identificar soluções distintas, no sentido de apresentar alguma diversidade ao AD, mas, por outro lado, evitar fazer representar nesse conjunto de

soluções, regiões onde se localizam soluções com pouco ou nenhum interesse para o AD. Por um lado, é praticamente impossível a identificação total do conjunto de soluções óptimas de Pareto e, por outro lado, não interessará intensificar a pesquisa em regiões que não apresentem boas soluções de compromisso para o AD. Ou seja, deverá procurar-se identificar uma fronteira não dominada, esperadamente próxima da Frente Óptima de Pareto, com diversidade nas soluções, mas abrangendo sobretudo as regiões que apresentem soluções de compromisso interessantes para o AD.

Dadas as características do problema, optou-se por recorrer a um AG para o processo de optimização, onde cada indivíduo (solução) é representado por três vectores de dimensão N (um vector para cada tipo de equipamento GD, BCs e DRA), em que N é o número de nós da rede eléctrica em estudo. Cada posição nos vectores corresponde ao nó da rede eléctrica e o valor inteiro que lhe está associado identifica o tipo de equipamento a instalar nesse nó. O tipo de unidade GD é identificado por um valor inteiro entre 0 e 6, em que 0 significa que não existe qualquer unidade GD instalada naquele nó; isto é, existem 6 tipos diferentes de unidades GD que podem ser instalados na rede. O mesmo sucede para as outras tecnologias BCs (de 0 a 3, i. e. apenas são utilizadas 3 tipos de BCs) e DRA (de 0 a 1, i. e. apenas pode ser instalado um tipo de DRA) (figura 5.1).

Equipamentos	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	…								N
GD																															
BC																															
DRA																															

Figura 5.1 – Estrutura de uma solução.

Identificada a ferramenta metodológica a usar, houve necessidade de tomar decisões em termos de implementação, conjuntos de parâmetros, etc. A abordagem para a ordenação de mérito das soluções a utilizar é baseada no conceito de optimalidade de Pareto. Não sendo nossa intenção identificar todas as possíveis soluções não dominadas para o problema, pretende-se ainda assim ter diversidade nas soluções obtidas. Na abordagem com recurso à não dominância todos os objectivos têm geralmente igual importância, pelo menos durante a fase de pesquisa, apesar de mesmo nestas abordagens haver autores a atribuir pesos aos

diferentes objectivos e alterando ligeiramente o conceito de não dominância (Cvetkovic e Parmee, 1999a e 1999b). Tendo em atenção estes aspectos, optou-se por uma abordagem com recurso ao conceito de não dominância, como proposta por Goldberg (1989), com algumas características adicionais, como a introdução de tolerâncias de não dominância entre soluções não dominadas vizinhas, que comprovadamente melhoraram o seu desempenho neste caso particular.

Podem sempre perguntar-se as razões da não utilização de uma implementação já existente e com resultados comprovados, estando até disponíveis, recentemente, algumas implementações melhoradas relativamente aos algoritmos de primeira geração (Deb et al., 2000; Knowles e Corne, 2000; Rudolph, 2001; Zitzler e Thiele, 1998a). Duas razões principais levaram a não recorrer a essa solução. Por um lado, a necessidade de identificar uma frente não dominada aproximada à Frente Óptima de Pareto mas que evite as regiões do espaço de pesquisa com soluções sem grande interesse para o AD (para tal consideram-se as restrições como os limites de tensão nos barramentos e o coeficiente binário que indica se é ou não possível a instalação de um dado tipo de equipamento num dado nó da rede). Por outro lado, como o mapeamento do espaço das variáveis de decisão no espaço das funções objectivo é feito com recurso ao trânsito de potência, optou-se por não limitar directamente a pesquisa impondo, por exemplo, limiares de aceitação nas funções objectivo. Esta opção deve-se ao facto de não ser fácil substituir uma solução que viole tais limiares por outra que não os viole e, por isso, optou-se por deixar que a função de avaliação de desempenho dos indivíduos se encarregue de penalizar suficientemente as soluções violadoras, levando à sua não continuação prolongada na população. Boa parte das implementações já existentes procura fazer uma caracterização exaustiva de toda a frente não dominada. Não havendo qualquer conhecimento acerca da Frente Óptima de Pareto, tal pode originar a manutenção na população de indivíduos com mau desempenho, de acordo com alguma referência que se use para a avaliação dos resultados. Além disso, a utilização de um comportamento elitista, que faz uso de informação acerca da evolução do processo de pesquisa, revelou-se essencial no bom desempenho do algoritmo. Uma última questão que interessava averiguar era o desempenho do algoritmo, sendo atractivo que o processo elitista fosse implementado de forma a manter na população os melhores indivíduos obtidos em iterações anteriores, sem necessidade de recorrer a populações extra que teriam que ser totalmente renovadas.

5.3.1. Caracterização do AG implementado

Em termos algorítmicos, o processo de identificação de soluções para o problema, com a utilização de um AG, será composto essencialmente por quatro processos fundamentais: geração aleatória da população inicial P_0 de soluções não dominadas, avaliação do desempenho das soluções, selecção das soluções potencialmente não dominadas e aplicação dos operadores genéticos (figura 5.2).

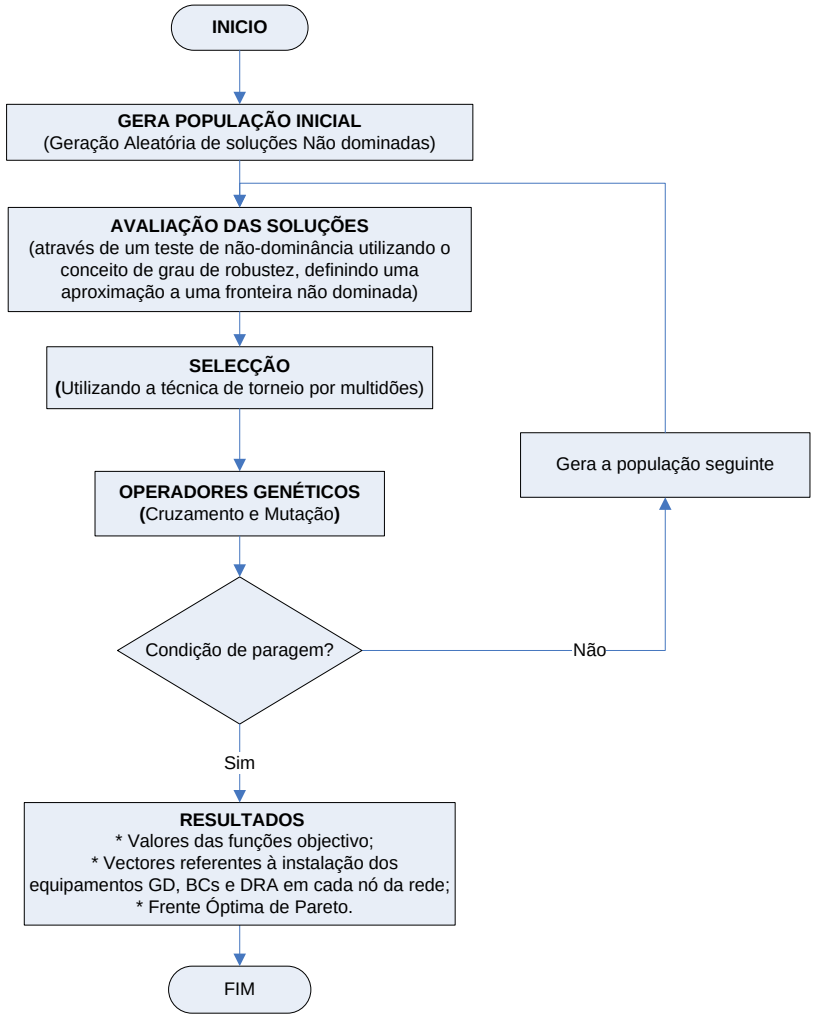

Figura 5.2 – Fluxograma geral do AG desenvolvido para a selecção e localização de tecnologias GD, BCs e DRA em redes de distribuição.

Na implementação do AG para caracterizar a frente não dominada foi utilizada uma estratégia elitista com uma população secundária constituída apenas por soluções admissíveis não dominadas de dimensão máxima constante. A estratégia elitista tem como objectivo aumentar o desempenho do algoritmo, isto é, por um lado aumenta a velocidade de convergência no sentido da fronteira não dominada; por outro lado, pretende assegurar que as soluções são realmente não dominadas e que

se encontram bem diversificadas. Esta é uma questão fundamental para os problemas do mundo real, uma vez que o AD deve ser dotado de informação sobre um conjunto de soluções bem distribuídas para a sua tomada de decisão. De modo a influenciar o processo iterativo para se obterem soluções mais robustas, é embebido na medida de desempenho o conceito de robustez juntamente com um teste de não dominância (Barrico e Antunes, 2007). Em cada nível (frente) de não dominância, as soluções mais robustas possuem maior probabilidade de trazer o seu contributo para as próximas gerações. Na construção do algoritmo utilizou-se a seguinte nomenclatura:

P_0 - População inicial.
NP_0 - Dimensão da população inicial.
P_S - População Secundária.
NP_S - Dimensão da população Secundária.
P - População principal.
NP - Dimensão da população Principal.
E - Número de indivíduos elite.
NPs_{cand} - Número de soluções candidatas à população secundária.
$Valor_{Max}$ - Valor máximo da medida de desempenho a atribuir a uma solução da primeira frente.
r - Raio do nicho definido à volta de uma solução.
k_{Torn} - Número de soluções escolhidas aleatoriamente na selecção por torneio.
p_m - Probabilidade de mutação.
p_c - Probabilidade de cruzamento (neste caso é sempre igual a 1).
D_{Nicho} - Nicho de raio dinâmico (razão entre a distância entre soluções óptimas das funções objectivo e o número máximo de indivíduos da população secundária).
D - Distância máxima entre soluções necessária para formar uma frente bem distribuída.

O algoritmo apresenta os seguintes passos principais:

- Calcula o grau de robustez de cada indivíduo da população principal *P*;
- Calcula a medida de desempenho dos indivíduos da população principal *P*;
- Selecciona *NP-E* indivíduos da população principal *P* utilizando a técnica de torneio por multidões;

- Cria uma nova população de *NP-E* indivíduos obtidos por aplicação de operadores genéticos (cruzamento e mutação);
- Selecciona aleatoriamente *E* indivíduos (elite) para formar a população P_S.
- Realiza a avaliação dos indivíduos através de um teste de dominância utilizando os seus graus de robustez, que define uma aproximação a uma fronteira não dominada;
- As soluções não dominadas obtidas são usadas para actualizar a população secundária P_S usando uma técnica de partilha da função aptidão, caso seja necessário, cuja intenção é facultar que no espaço dos objectivos possamos obter uma distribuição o mais uniforme possível da população secundária.

A população utilizada na implementação do algoritmo é constituída por indivíduos representados através três vectores de valores inteiros, um para cada tipo de equipamento a instalar GD, BCs e DRA. Cada vector possui uma dimensão correspondente ao número de nós da rede. Cada posição (nó) de cada vector é preenchido com um número inteiro que representa o tipo de equipamento a instalar nesse nó (se o vector referente às tecnologias GD apresentar numa posição o valor inteiro 0 significa que nenhuma unidade GD é instalada, caso apresente um valor compreendido entre 1 e 6 significa que será instalada um tipo específico de GD), e o mesmo sucedendo para o caso dos vectores correspondentes às BCs e aos DRA.

5.3.2. Medida de Desempenho

A medida de desempenho ou função aptidão de cada solução depende do respectivo valor de robustez e do teste de dominância. Para cada solução, o cálculo da medida de desempenho é realizado através de um ordenamento elitista por não dominância, tal como no NSGA – II (Deb et al., 2000), que envolve a determinação de várias frentes de soluções: admissíveis não dominadas, admissíveis dominadas e não admissíveis.

Nesta implementação é analisada a robustez das soluções geradas, pois o seu valor contribui para a avaliação da solução (indivíduo de uma população) permitindo classificar as soluções de acordo com os seus graus de robustez (Barrico e Antunes, 2007).

A operacionalização da medida de desempenho é constituída pelos seguintes passos:

- Inicialmente é definido um nicho de raio $D = Dist_{max}/NP$, onde $Dist_{Max}$ representa a distância entre os melhores e piores valores de cada função objectivo da população principal;
- À primeira frente de soluções não dominadas é atribuído um valor de desempenho igual a $NP.(Valor_{Max} + 1)$, onde o $Valor_{Max}$ corresponde ao maior grau de robustez calculado;
- Para cada solução, a medida de desempenho é recalculada multiplicando-a pelo seu grau de robustez;
- Em seguida, as soluções da primeira frente são ignoradas temporariamente, e as restantes soluções são processadas através de um teste de dominância de onde resulta uma segunda frente constituída por soluções não dominadas;
- A esta segunda frente de soluções é atribuído um valor da medida do desempenho igual ao menor valor da medida do desempenho das soluções da primeira frente subtraindo $Valor_{Max}+1$;
- Para cada solução a medida de desempenho é recalculada multiplicando-a pelo seu grau de robustez.

Este processo é repetido até ser atribuído, a todas as soluções admissíveis dominadas e não admissíveis, um valor da medida de desempenho. Este processo de medição do desempenho privilegia as soluções não dominadas, uma vez que todas as soluções da primeira frente têm um valor de medida de desempenho superior ao de todas as soluções da segunda frente, e assim por diante (Figura 5.3).

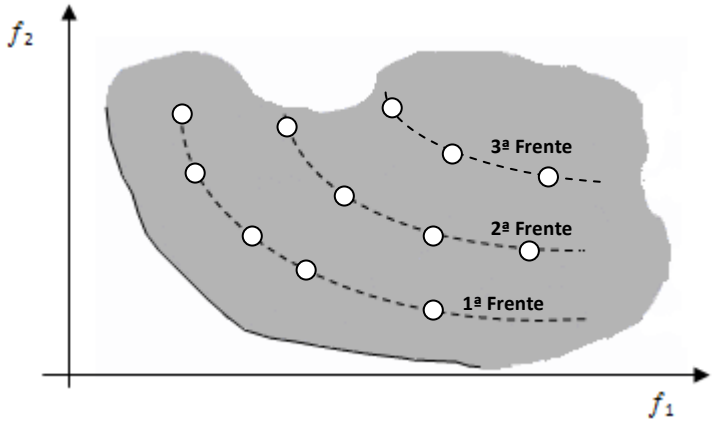

Figura 5.3 – Distribuição das soluções por frentes (para duas funções objectivo).

Caso duas soluções apresentem o mesmo valor de desempenho, a melhor solução será aquela que apresentar menos soluções na sua vizinhança, confinadas por um nicho de raio *D.*

Este procedimento visa assegurar que soluções pertencentes a um nível de dominância *k* apresentem um melhor valor de desempenho do que as soluções do nível *k+1*, e que soluções pertencentes ao mesmo nível mas com maior valor de robustez possuam um melhor valor de desempenho. Por fim, as melhores soluções de um grupo com um mesmo nível de dominância e igual valor de robustez, serão as que apresentarem menos soluções dentro do seu nicho.

5.3.3. Geração da população inicial

A população inicial P_0 resulta da geração aleatória de três tipos de soluções: soluções admissíveis e não admissíveis, soluções admissíveis (dominadas e não dominadas) e soluções admissíveis não dominadas. O processo de geração aleatória de cada tipo de solução consiste nos seguintes passos gerais:

- Gera uma solução;
- Se esta solução corresponder ao tipo seleccionado relativamente à população inicial, então inseri-la nesta população e actualizar a população inicial (aplicando o teste de dominância, quando for o caso);
- Senão volta ao passo inicial (gera nova solução).

Dos três tipos de soluções referidas, a que apresentou melhores resultados foi a que considera soluções admissíveis não dominadas. No entanto, sempre que o número de soluções admissíveis não dominadas for insuficiente, a população inicial pode também conter soluções admissíveis dominadas. Para tal, usa-se um contador de soluções admissíveis geradas. Quando este contador atingir um número predefinido, se a população inicial ainda não estiver completa, então as próximas soluções admissíveis geradas são automaticamente inseridas na população inicial até esta ficar completa.

A colocação aleatória de cada equipamento (GD, BCs e DRA) na rede é realizada da seguinte forma:

- Inicializa os vectores inteiros de dimensão *N* (onde *N* é o número de nós da rede) referentes a cada equipamento GD, BCs e DRA;
- Para cada posição dos respectivos vectores:

- se é permitido instalar o equipamento (por razões técnicas, operacionais ou outras) então essa posição assume um inteiro entre 0 e *Y* (em que 0 significa que a tecnologia (GD, BCs ou DRA) não é instalada naquele nó; isto é, existem *Y* tipos diferentes de unidades referentes a cada tecnologia que podem ser instalados na rede);
- Senão é atribuída a essa posição o inteiro zero (não é permitido instalar o equipamento GD, BCs ou DRA nessa posição da rede).

Cada solução é, gerada de forma aleatória e analisada sob o ponto de vista do trânsito de potência da rede, verificando-se desta forma a admissibilidade das soluções geradas relativamente às restrições e equações de operação do sistema.

5.3.4. Selecção por torneio

Na selecção por torneio baseado na técnica de multidões, é escolhido aleatoriamente um grupo de k_{Torn} soluções, sendo depois seleccionadas as que apresentem maior valor da medida de desempenho. O processo é repetido o número de vezes correspondente ao número de soluções a escolher. A implementação mais comum, e que é a aqui adoptada, assume $k_{Torn}=2$, isto é, as soluções são escolhidas duas a duas, acabando por ser seleccionada a solução que apresentar melhor medida de desempenho (em termos de ordenação das frentes não dominadas). Em caso de empate, será seleccionada a que tiver maior distância de multidões (aquela que se localiza na área de menor densidade).

5.3.5. Operadores Genéticos

5.3.5.1. Cruzamento

Foram utilizadas as técnicas de um ponto de cruzamento, dois pontos de cruzamento (os dois pontos são obtidos de forma aleatória com a restrição de que devem estar pelo menos separados de ¼ da dimensão do cromossoma) e de cruzamento uniforme com uma probabilidade igual a 1, isto é, há sempre cruzamento. Dependendo do tipo de rede, os tipos de cruzamento que apresentaram os melhores resultados foram os que utilizaram as técnicas de cruzamento de dois pontos e uniforme.

5.3.5.2. Mutação

A mutação consiste em modificar (com uma probabilidade p_m) o valor corrente do índice que indica a tecnologia para outro valor dentro do respectivo intervalo (isto é, seleccionando outro tipo de GD, BCs ou DRA). A técnica de mutação utilizada modifica apenas um dos parâmetros da solução existente (tipo de tecnologia GD, BCs ou DRA), substituindo-o por um valor gerado a partir de um intervalo pré-estabelecido. Isto é, se tivermos 6 tecnologias GD e se inicialmente num dado barramento escolhido aleatoriamente para mutação estiver instalada a tecnologia do tipo 1, de acordo com a probabilidade de mutação pode ser instalada nesse nó uma outra tecnologia de entre as 6 possíveis. Caso não seja possível instalar nenhuma das outras 5 disponíveis, esse nó fica sem GD. O mesmo acontece para as BCs e DRA.

5.3.5.3. Elitismo

A estratégia de elitismo implementada procura garantir que sejam mantidos na população os melhores indivíduos, evitando, desta forma, uma eventual degradação do desempenho da população, entendida como uma diminuição da qualidade dos melhores indivíduos presentes numa dada geração. Assim, procura por um lado, acelerar a convergência para a frente não dominada e, por outro, garantir que as soluções encontradas são de facto não dominadas e estão bem distribuídas pela frente.

A população secundária é constituída por NP_S indivíduos seleccionados aleatoriamente da mais recente população criada após a aplicação dos operadores genéticos.

O número de eleitos influencia a pressão de selecção: se forem poucos não se verificam as vantagens do elitismo; se forem muitos perde-se diversidade com eventual convergência prematura. Como tal, se a população secundária, P_S, for maior ou igual do que a população actual, P, copiam-se todos os indivíduos não dominados de P para a população secundária; caso contrário, são seleccionados aleatoriamente NP_S indivíduos da actual população para formarem a população secundária.

5.3.5.4. Partilha da função aptidão ou mecanismo de manutenção de diversidade

Este mecanismo é utilizado para actualizar a população secundária, servindo-se de um nicho D_{Nicho} cujo raio é um valor dinâmico. Este mecanismo é aplicado após terem sido obtidas todas as soluções não dominadas, que são candidatas a pertencerem à população secundária, caso o número de soluções candidatas à população secundária (NP_{Scand}) seja maior do que a dimensão NP_S desta população P_S. Isto é, todas as soluções que já pertençam à população secundária, as quais são não dominadas em relação a qualquer solução da população principal, e as soluções não dominadas da população principal que são não dominadas em relação às soluções da população secundária. Este mecanismo consiste nos seguintes passos:

- Seleccionar as soluções extremas (aquelas com os melhores valores para cada função objectivo);
- Inserir as soluções extremas;
- Calcular o primeiro valor para o raio dos nichos, D_{Nicho}, como o quociente entre a distância normalizada entre as soluções extremas e o tamanho máximo da população secundária (i.e., D_{Nicho}=*Distancia(MinFO1,MinFO2)* $/ NP_s$);
- Enquanto a população secundária não estiver completa:
    - Inserir do conjunto de soluções candidatas, NPs_{cand}, aquelas que se encontram a uma distância superior a D_{Nicho} das que já pertencem à população secundária, onde a prioridade é atribuída pelo grau de robustez;
    - Actualizar o valor do raio D_{Nicho}, reduzindo o seu valor inicial em 5%.

5.3.6. O Algoritmo Desenvolvido

O algoritmo desenvolvido para localização e dimensionamento de unidades GD, BCs e DRA em redes de distribuição, encontra-se descrito nos seguintes passos:

- *Inicialização* (Gera de forma aleatória a população inicial P_0 de dimensão NP_0);
- *Robustez* (Cálculo do grau de robustez de cada indivíduo da população inicial);

- *Avaliação* (Cálculo da medida de desempenho de cada indivíduo de P_0);
- *Determina a primeira população secundária P_S resultante de P_0 de dimensão NP_S:*
  - Se ($NP_S \geq NP_0$) então copia todas as soluções não dominadas de P_0 para P_S;
  - Senão aplica "partilha" a P_0 de modo a seleccionar NP_S soluções;
- População actual toma o lugar da população inicial P_0;
- *Enquanto não for atingido o número de iterações predefinido:*
  - Construção da população principal *P* da geração seguinte de dimensão *NP*:
    - Introduz directamente por selecção aleatória, *E* indivíduos de P_S em *P*;
    - Enquanto em *P* não houver *NP* indivíduos:
      - ✓ Selecciona 2 indivíduos da população actual por torneio;
      - ✓ Aplica operadores genéticos, cruzamento e mutação, aos 2 indivíduos seleccionados;
      - ✓ Insere os novos indivíduos em *P*;
  - *Robustez* (Cálculo do grau de robustez de cada individuo da população principal);
  - *Avaliação* (Cálculo da medida de desempenho de cada indivíduo e realizar teste de dominância);
  - Determina as soluções candidatas (NPs_{cand}) à população secundária;
  - Actualiza a população secundária P_S:
    - Se ($NPs \geq NPs_{cand}$) então copia todas as soluções candidatas (NPs_{cand}) não dominadas para *Ps*;
    - Senão aplica mecanismo de "partilha" a todas as soluções (NPs_{cand}) encontradas de modo a seleccionar *NPs* soluções;
  - População actual secundária toma o lugar da população principal *P*.

5.4. Conclusão

O problema da colocação de GD, BCs e DRA em redes de energia, tendo em conta aspectos de avaliação de ordem económica, operacional e de qualidade de serviço, é de natureza combinatória não sendo exequível a utilização de algoritmos de programação matemática.

No modelo matemático desenvolvido foram tidos em conta distintos aspectos de avaliação do mérito das soluções, através da consideração explícita da minimização do custo e das perdas como funções objectivo a optimizar. No que diz respeito à qualidade de serviço, foi criado à posteriori, na fase de análise de soluções, um atributo "Potência Fornecida" para que o AD possa aferir a qualidade das soluções sob esse aspecto. Este atributo não faz parte do modelo matemático, sendo calculado apenas para as soluções que constituem a população final. Para o seu cálculo, utiliza a informação resultante do modelo de localização e dimensionamento de unidades GD, BCs e DRA. Para uma dada solução, a rede é dividida em zonas a partir do conhecimento da localização dos DRA. De seguida são simuladas avarias nos ramos da rede; localizadas as avarias, estas são isoladas pelos DRA e todas as cargas dessa zona ficam fora de serviço. No entanto, as restantes zonas a jusante da zona com avaria e não afectadas por avarias nos seus ramos permanecem em funcionamento desde que possuam GD. Neste caso se as cargas nos nós dessa zona apresentarem uma potência maior do que a potência fornecida pelas unidades GD são realizadas ordens de deslastre (por ordem de prioridades das cargas) até que a potência fornecida seja maior ou igual à requerida pelas cargas. O valor do atributo "Potência fornecida" resulta, assim, da diferença entre a carga total imposta pela rede antes de qualquer avaria e a carga não fornecida resultante do cenário de avarias.

Através do modelo multi-objectivo desenvolvido para o problema de selecção e localização de unidades GD, BCs e DRA, o gestor da rede tem possibilidade de escolher soluções de compromisso satisfatórias entre os dois objectivos e o atributo "Potência Fornecida" que estão em jogo e lhe interessam em simultâneo. O modelo matemático tem a vantagem de respeitar a natureza discreta das variáveis relativamente à capacidade e local de instalação. Permite também escolher previamente os locais onde não convém instalar GD, BCs ou DRA, seja por motivos técnicos ou outros.

O uso de um AG é especialmente interessante em problemas multi-objectivo de natureza combinatória, em que é útil dar ao AD informação sobre soluções não dominadas suficientemente diversas.

6. ESTUDO DE CASOS

Com o objectivo de providenciar apoio à tomada de decisão no problema de localização e dimensionamento de tecnologias GD e BCs, assim como da colocação de DRA, em redes de distribuição de energia eléctrica, dada a complexidade do problema, surgiu a necessidade de criação de uma aplicação computacional dedicada a este tipo de problema baseada em AGs.

O problema, tal como descrito no capítulo 5, é de natureza multi-objectivo, com variáveis reais, inteiras e binárias, e apresenta restrições e funções objectivo não lineares. Dada a natureza combinatória do problema torna-se necessária a criação de um ambiente de simulação e teste, que permita adaptar a metodologia de resolução à especificidade do problema.

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação desenvolvida, apresentando-se também as opções metodológicas, os pressupostos e as simplificações que estiveram na base do seu desenvolvimento.

Neste estudo consideram-se duas redes de distribuição: uma de 94 nós, cujos dados foram retirados de Pires et al. (2001) e uma segunda rede de 86 nós. Nesta segunda rede a distribuidora enfrentava algumas restrições de capacidade, quer na subestação, quer em alguns dos Postos de Transformação (PTs), traduzindo-se em baixos níveis de tensão e congestionamentos.

6.1. Algumas opções metodológicas

6.1.1. Redes de distribuição

As redes de distribuição que servem de base aos estudos apresentados neste capítulo foram as que acompanharam o desenvolvimento da ferramenta computacional descrita. Inicialmente utilizou-se uma rede radial retirada de Pires et

al. (2001) com 94 nós, do sistema de distribuição nacional. A rede apresentava derivações a partir de alimentadores secundários, tendo esses autores optado por simplificar estas derivações substituindo-as por pontos de carga representativos da carga alimentada em cada derivação (à excepção das perdas, que são assim desprezadas). No Anexo B (figura B.1) encontra-se a topologia e dados relativos a esta rede.

Posteriormente, numa fase mais adiantada do trabalho, foram utilizados dados relativos a uma segunda rede do sistema de distribuição nacional, com 86 nós. Esta rede apresenta também um número elevado de nós e uma topologia similar à anterior, cujos dados estão disponíveis no anexo B, figura B.2. Dado que esta rede tinha sido alvo de reforço, cujo plano de intervenção delineado passou pela duplicação de linhas em alguns troços, instalação de BCs e instalação de um parque eólico, julgou-se interessante avaliar as soluções apresentadas pela metodologia desenvolvida para posterior comparação.

6.1.2. Baterias de condensadores

As baterias de condensadores utilizadas para fazer a compensação foram seleccionadas de um catálogo comercial (Schneider Electric, 2008). As capacidades das BCs foram seleccionadas com base nos valores de potência reactiva consumida nos nós das redes. Por razões de ordem económica e técnica optou-se por instalar as BCs sempre do lado de Baixa Tensão. As razões económicas prendem-se, por um lado, com o custo de aquisição das próprias BCs (sendo mais baratas em Baixa Tensão); por outro lado, evita o sobredimensionamento dos PTs (minimizando o trânsito de potência reactiva através destes). Em relação às razões de ordem técnica é de destacar que a instalação das BCs do lado de Baixa Tensão suprime a necessidade de telecontrolo, devido à instalação de um relé varimétrico, permitindo que o controlo das BCs seja feito por escalões (Pires, 2001).

Na tabela 6.1, os custos das BCs apenas consideram os custos de aquisição (considerando o armário, contactos e relés varimétrico) e instalação.

Capacidade das BCs (em KVAr)	Custo (em Euros)
25	385
30	840
60	1225

Tabela 6.1 – Relação entre a Potência e o custo das baterias de condensadores.

6.1.3. Tecnologias GD

Das tecnologias GD existentes no mercado, para instalação em redes de distribuição em Média Tensão, foram seleccionadas as que melhor se enquadravam com a realidade das redes em estudo (nível de tensão, modularidade, custo, impacto ambiental e disponibilidade energética no local). Optou-se ainda por tecnologias que utilizem, fundamentalmente, energias renováveis, embora considerando também as tecnologias não renováveis de elevada eficiência. Aquando da selecção dos equipamentos outra das preocupações recaiu nos custos, dado que os custos de aquisição e instalação variam de forma significativa com o tipo de tecnologia, fabricante, capacidade, entre outros factores. Estima-se que os custos típicos variam entre as centenas de Euros por kW para os motores de combustão interna a gás até cerca de 5000 Euros por kW para um sistema solar fotovoltáico. De entre as tecnologias de pequena potência, o motor de combustão interna (MCI) a biogás, por exemplo, apresenta o menor custo de aquisição mas elevados custos de operação e manutenção. As tecnologias de energias renováveis (solar e eólica) possuem os maiores custos de aquisição, mas os mais baixos custos de operação e manutenção. As tecnologias mais eficientes (microturbinas e pilhas de combustível) encaixam-se entre as duas situações extremas apresentadas.

As tecnologias GD utilizadas para alimentar o modelo foram seleccionadas com base nas disponibilidades energéticas das zonas de implantação das redes em estudo. De modo a ser o mais realista possível em termos dos custos das tecnologias GD adoptadas, os valores utilizados, apresentados na tabela 6.2, foram resultado de alguns pedidos de orçamento efectuados directamente a empresas que comercializam e instalam este tipo de equipamentos.

Tecnologia Tipo	Tecnologia	Potência da unidade GD (em kW)	Custo (em 10^3 Euros)
1	MCI /Bio-Gás	250	225
2	Biomassa/cogeração	500	500
3	Micro Turbina a Gás	100	110
4	Pilha de Combustível	150	450
5	Eólica	250	300
6	Solar Fotovoltáico	150	750

Tabela 6.2 – Potência e custo das unidades GD utilizando diversas tecnologias.

Para o cálculo dos custos associados a cada uma das tecnologias GD e para as potências especificadas, foram tidos em conta os custos de investimento (aquisição e instalação) e os custos de operação e manutenção. Enquanto os primeiros se caracterizam, geralmente, por corresponderem a pagamentos em datas bem determinadas, os segundos revestem-se de um carácter periódico. Para a obtenção destes valores as empresas às quais pedimos orçamento utilizaram o método do valor actual, que consiste em transportar para o ano zero todos os investimentos e rendas que se consideram. Para tal, foi especificado o horizonte de estudo (10 anos) e o ano deste período de planeamento em que se pretende realizar o investimento numa determinada tecnologia. Assim, tendo em conta a evolução previsível da carga, definimos que para o horizonte de estudo as tecnologias seriam instaladas de acordo com o especificado na tabela 6.3.

Tecnologia Tipo	Tecnologia	Potência da unidade GD (em kW)	Ano em que é instalada (no horizonte de 10 anos)
1	MCI /Bio-Gás	250	4
2	Biomassa/cogeração	500	2
3	Micro Turbina a Gás	100	2
4	Pilha de Combustível	150	6
5	Eólica	250	0
6	Solar Fotovoltáico	150	0

Tabela 6.3 – Ano do período de planeamento em que são instaladas as unidades GD.

O custo de investimento e os encargos de operação e manutenção de cada tecnologia incorridos num dado ano do período de planeamento são actualizados para o ano zero, usando uma taxa de actualização (7%), de modo a poderem ser somados na função objectivo custo total. Os encargos de operação e manutenção são considerados como uma percentagem dos custos de investimento, dependendo do tipo de tecnologia e do ano de instalação.

6.1.4. Disjuntores Remotamente Accionados

Os DRA, utilizados para a definição de *zonas,* foram seleccionados com base na auscultação directa a empresas como a *Schneider Electric* e *ABB*. A selecção baseou-se nos seguintes critérios: o tipo de disjuntor tipicamente utilizado nestas circunstâncias, o custo, nível de tensão, os tempos de manobra face à potência e tipos de carga em questão. O custo médio orçamentado, incluindo o sistema de tele-rearme, ronda os 10 mil Euros.

Ano	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Nº de Avarias	28	33	28	22	30	34	41	31	29	27	26

Tabela 6.4 – Ocorrências de avarias na rede de 86 nós entre 1997 e 2007.

Para as redes de 94 e 86 nós, a instalação de DRA é realizada com base na informação referente à taxa média de avarias nos ramos da rede. No caso da rede de 86 nós utilizou-se a informação disponibilizada entre 1997 e 2007 (tabela 6.4) referente ao número médio de avarias registadas na rede num dado intervalo temporal e o número médio de avarias nos ramos, para calcular a taxa de avarias nos ramos da rede. No caso da rede de 94 nós, como eram conhecidos os comprimentos e as secções de cada ramo foi possível calcular a taxa média de avarias nos ramos. Com esta informação definiu-se um limiar de modo a delimitar a instalação de DRA, tal sendo apenas possível em ramos cuja taxa de avarias se situasse entre o maior valor registado na rede e um valor mínimo definido pelo AD.

6.1.5. Cenários de carga

A instalação de tecnologias GD e de BCs 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 outro lado, quando se pretende definir a potência das tecnologias GD e as capacidades das BCs para uma rede de distribuição, torna-se necessário decidir qual o cenário de carga para o qual estas vão ser dimensionadas.

No caso das redes estudadas, a situação "ideal" seria a de dispor de diagramas de carga típicos de todos os nós e fazer uma análise discreta ao longo de um dia. Dado que apenas estão disponíveis os valores das potências de ponta pedida em cada nó (potência fornecida por cada um dos PTs), optou-se por não considerar como cenários de estudo nem a ocorrência simultânea de pontas, nem situações intermédias arbitrariamente consideradas por uma fracção da ponta igual em todos os nós de carga. Procurou-se, antes, estabelecer para cada nó valores de fracção da ponta diferentes uns dos outros, tendo em conta sempre as condições de carga mais severas da rede (Pires, 2001). Assim consideraram-se os seguintes pressupostos:

- Considerou-se o intervalo entre as 18 e as 22 horas durante o qual se verifica uma maior duração da ponta, inclusivamente a ponta máxima (figura 6.1);

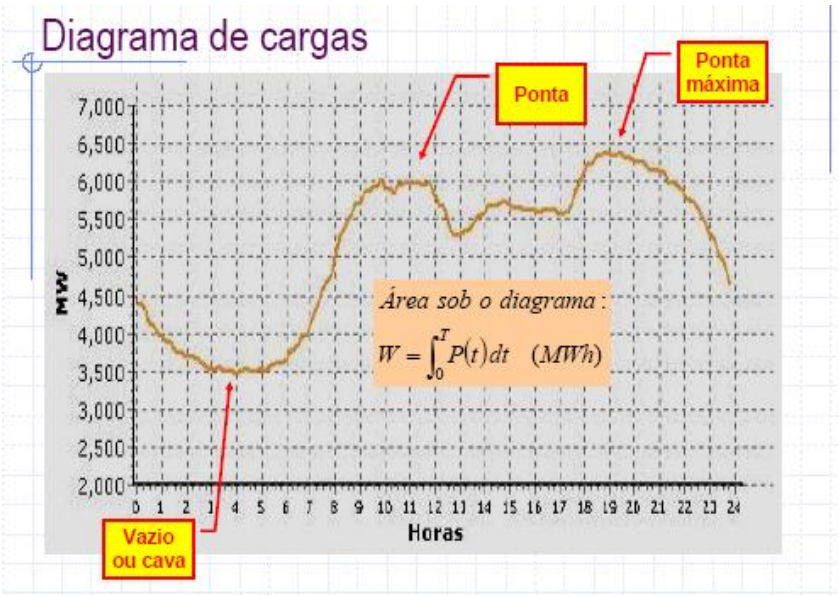

Figura 6.1 - Diagrama de carga típico da rede de distribuição nacional de MT.

- Considerou-se uma curva aproximada da zona da ponta de um diagrama de carga típico da rede de distribuição nacional, com uma duração superior ao intervalo considerado, como se pode observar na figura 6.2;

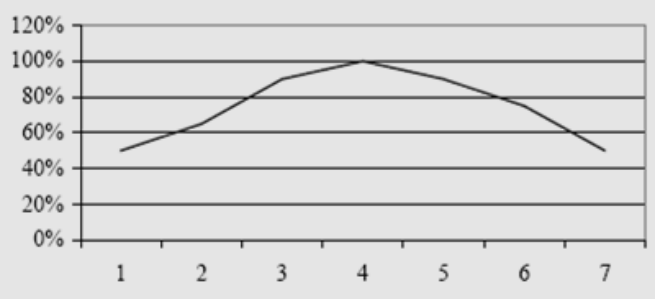

Figura 6.2 – Curva aproximada da zona da ponta dos diagramas de carga.

- Considerou-se uma distribuição aleatória dos instantes de ocorrência das pontas (numa determinada hora, alguns transformadores estão na sua ponta de carga, outros estarão apenas a uma percentagem da sua carga máxima).

Para realizar este ponto considerou-se uma função que distribui aleatoriamente as pontas dos 94 e 86 postos de transformação das duas redes, ao longo do intervalo 18-22 horas. A distribuição de pontas adoptada encontra-se ilustrada na figura 6.3.

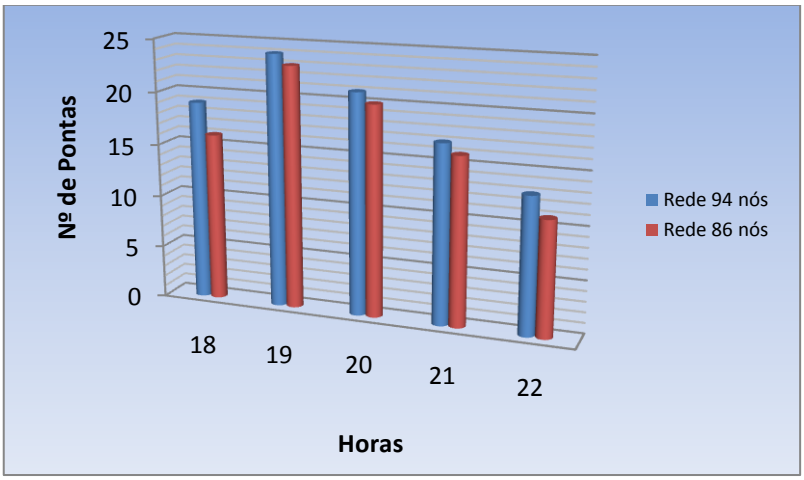

Figura 6.3 – Distribuição das pontas no intervalo 18 – 22 horas.

- Com os dados obtidos traçou-se a ponta de um diagrama de carga, entre as 18 e as 22 horas, como se pode observar na figura 6.4, a partir do qual é possível obter vários cenários de carga da rede.

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 PTs. Esta opção da ocorrência simultânea de pontas, aliás pouco provável, poderia conduzir facilmente a solução para uma situação de sobre-instalação de GD e BCs. Adoptou-se a situação de carga correspondente às 18 horas para fazer a colocação de GD e das BCs na rede (Figura 6.4), considerando uma taxa de crescimento de procura de 4% ao ano (valor considerado constante, retirado do site oficial da EDP).

Como se considera a instalação de BCs do lado de baixa tensão, o problema de acompanhamento das alterações da carga é tratado através da instalação de relés varimétricos, que permitem a adaptação do valor de compensação através dos escalões das baterias. No que respeita às tecnologias GD considera-se que estas são instaladas em geral do lado de média tensão.

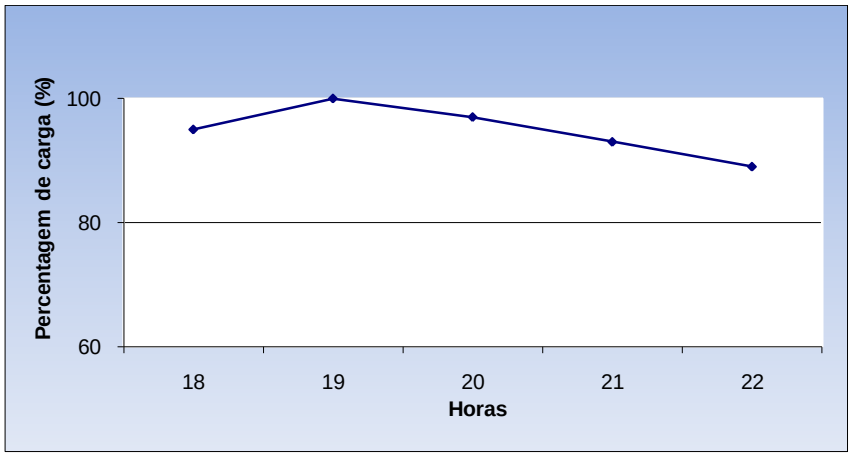

Figura 6.4 – Representação parcial do diagrama de carga, entre as18 e as 22 horas, considerado para as redes de distribuição de 94 e 86 nós.

6.1.6. Cenários de Avaria

Cada cenário de avarias está dependente de factores como o comprimento das linhas e a sua exposição a agentes atmosféricos (que são variáveis de acordo com a sua localização geográfica), ou das taxas de avarias dos vários equipamentos presentes na rede. Isto é, em cada nó de carga a partir do qual é alimentado um conjunto de consumidores, podem ser calculados três índices de fiabilidade básicos: *valor médio de taxa de saída de serviço,* λ_i *(avarias/ano),* o *valor da indisponibilidade média anual,* U_i *(horas/ano),* e o *valor médio do tempo de reposição de serviço,* r_i *(horas).* Estes índices são calculados a partir do conhecimento da composição e topologia da rede, dos modos de reposição de serviço associados às diversas avarias e dos índices de fiabilidade dos componentes. Como esta informação não nos foi facultada, não foi possível por esta via calcular indicadores de fiabilidade como o SAIFI ou o SAIDI, entre outros.

De acordo com o Regulamento de Qualidade de Serviço de Portugal continental (RQS, 2006), para efeitos de determinação dos indicadores de continuidade de serviço são consideradas apenas as interrupções de longa duração, definidas como tendo uma duração superior a três minutos. Todas as ocorrências indicadas na tabela 6.4, referente à rede de 86 nós, se encontram nestas condições.

Dado o desconhecimento dos índices de fiabilidade referente a todos os componentes das redes, utilizaram-se as taxas de avarias nos ramos das redes de 94 e 86 nós, cuja forma de cálculo já foi referida em 6.1.4, para o AD definir um cenário de avarias. Neste caso foi definido como cenário que a(s) avaria(s) iriam

ocorrer na zona 1, como representado nas figuras 6.7 e 6.15, impossibilitando que a rede fosse alimentada parcialmente pela Subestação (nó 0) e que estas ao serem geradas ocorressem nos ramos com taxa de avaria superior a um limiar pré-definido (95% da maior taxa de avarias registada nos ramos da zona 1).

6.2. Resultados Ilustrativos das redes

A metodologia descrita no capítulo anterior para caracterizar a Frente Óptima de Pareto, e servir de apoio à decisão com base no modelo multi-objectivo, foi aplicada à rede eléctrica de distribuição com 94 nós distribuídos por um alimentador principal e 24 laterais e à rede de 86 nós com 16 laterais.

6.2.1. Rede de distribuição de 94 nós

Esta rede caracteriza-se por, em períodos de sobrecarga, como é o que está em estudo, apresentar um perfil de tensões na maioria dos nós de valor abaixo dos 0,93 p.u., limite inferior do intervalo admissível para o valor da tensão, como se pode verificar nas tabelas apresentadas no anexo D, tabela D.2.

Na tabela 6.5 encontram-se os valores das perdas apresentadas pela rede sem qualquer instalação de GD, BCs e DRA, para o cenário de carga escolhido.

Perdas activas (kW)	Perdas reactivas (kVAr)
320,44	445,86

Tabela 6.5 – Perdas apresentadas pela rede de 94 nós antes da instalação de GD.

Das várias simulações realizadas com diferentes parâmetros, os melhores resultados foram obtidos como NP=100, NP_S=40, E=4, k_{Torn}=2, 10000 gerações, p_m=0,1 e p_c=1. A figura 6.5 apresenta a melhor frente de Pareto obtida, referente à população final.

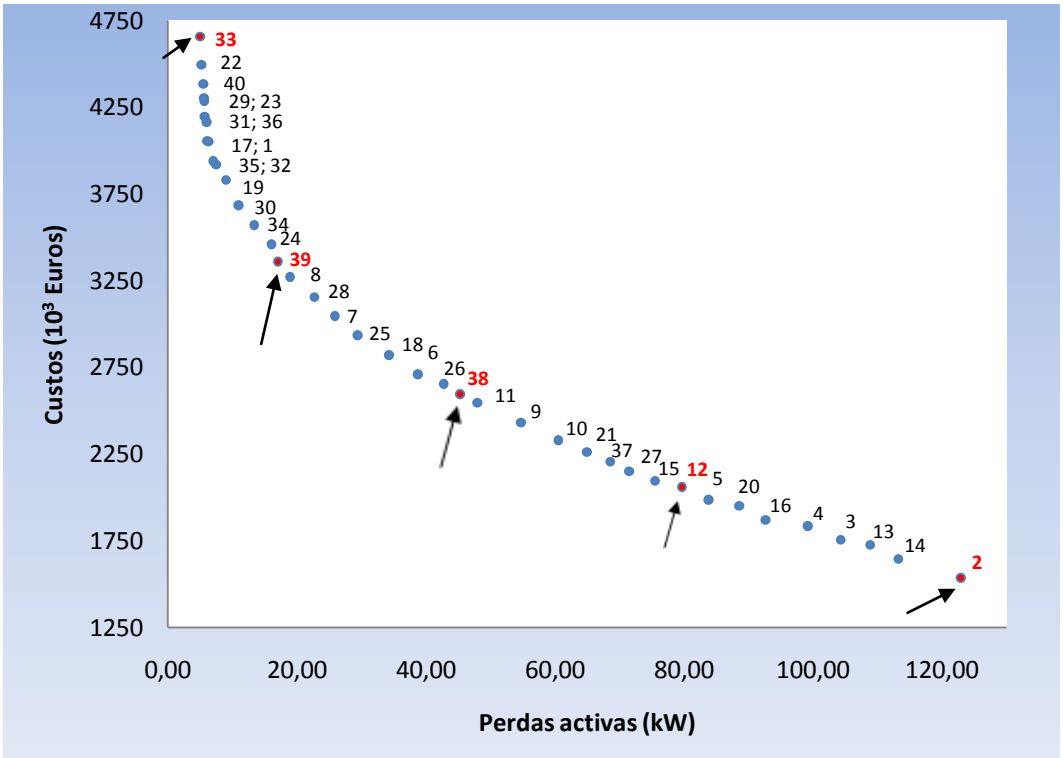

Figura 6.5 – População final com 40 soluções para a rede de 94 nós

Cada solução encontra-se associada a um determinado esquema de localização e dimensionamento: número e dimensão das tecnologias GD e BCs, bem como dos DRA, os nós da rede onde estes são instalados assim como o correspondente custo, perdas activas e atributo PF face a um cenário de avarias.

6.2.1.1. Funções objectivo, estrutura de localização e dimensionamento e parâmetros operacionais

Dado toda a informação referente a estas soluções se encontrar apresentada nas tabelas D.3 e D.4 do anexo D, face à dimensão da frente de Pareto, são analisadas apenas cinco soluções; as duas soluções extremas (2 e 33) e três soluções intermédias (12, 38 e 39), referenciadas na figura 6.5. Os valores das funções objectivo encontram-se na tabela 6.6 e a estrutura dos vectores de localização e dimensionamento na tabela 6.7.

Soluções	Custos (10^3 euros)	Perdas activas (kW)
2	1455,0	122,97
12	1980,0	79,74
33	4576,9	5,00
38	2515,0	45,33
39	3280,0	17,07

Tabela 6.6 – Funções objectivo das soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da rede de 94 nós.

No que respeita aos vectores localização e dimensionamento dos equipamentos (GD, BC e DRA) da tabela 6.7, cada posição representa o nó correspondente ao número de ordem da posição, i.e. a posição 0 representa a subestação, a posição 1 o nó 1, etc.

O tipo de GD instalado é indicado nesse vector por um inteiro, i.e. 3 na posição 1 indica que existe uma unidade GD do tipo 3 (microturbina) no nó 1 da rede. O número associado a cada GD é dado pela ordem com que as tecnologias GD surgem na tabela de dados, tabela 6.2. O número zero no vector indica que o nó não é equipado com GD. O mesmo acontece para o vector das BCs e o vector dos DRA.

Para estas soluções seleccionadas, a tabela 6.7 indica os nós da rede onde são colocados os vários tipos de dispositivos (unidades GD, as BCs e os DRA).

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
12	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6	3	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
33	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	3	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
38	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
39	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.7 – Vectores que contêm os locais de instalação e os tipos de GD, BCs e DRA das soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da melhor população final obtida.

Da tabela 6.6 e tabela 6.7 verifica-se que:

- A solução 2 apresenta o menor custo de instalação (1455 milhares de euros), mas as maiores perdas (122,97 kW). Esta solução representa para o AD uma alternativa mais económica em termos de instalação; no entanto, representará maiores custos em perdas. São instaladas 8 unidade GD (3 MCI a biogás, 4 microturbinas e uma eólica);
- Por sua vez a solução 33 representa o extremo oposto, onde o custo de instalação é de 4576,9 milhares de euros, cerca de 3 vezes mais cara do que a solução 2 mas com perdas da ordem dos 5 kW, i.e., 24,5 vezes inferior. Neste caso o AD deverá instalar 22 unidades GD (12 MCI a biogás, 1 a biomassa, 7 microturbinas, 1 eólica e 1 fotovoltaica) e 6 BCs de diferentes capacidades;
- As soluções 12, 38 e 39 são soluções intermédias com compromissos mais equilibrados entre as funções objectivo. A solução 12 apresenta um custo de instalação de 1980 milhares de euros, instalando 10 unidades GD e com perdas de 79,74 kW. A solução 38 apresenta um custo de instalação de 2515 milhares de euros, instalando 12 unidades GD, com perdas de 45,33 kW. A solução 39 tem um custo de instalação de 3280 milhares de euros, instalando 14 unidades GD apresentando perdas de 17,07 kW.

Das soluções analisadas, verificámos que apenas na solução 33 são instaladas BCs extra, enquanto que nas soluções 2, 12, 38 e 39 não são instaladas BCs, o que pode ser explicado através da instalação de BCs sempre que cada unidade GD é instalada (com capacidade de 40% da sua potência activa, cumprindo com a $tg\varphi=0,4$ prevista no Dec. Lei 312/2001), e pelo facto da rede não se encontrar inicialmente muito instável no que respeita aos seus parâmetros operacionais. A instalação de DRA e a divisão da rede em zonas será analisada com mais detalhe em 6.2.1.4. Perante um cenário de avarias, quanto maior for o número de unidades GD nessas zonas, maior será o número de consumidores que não sofrem interrupção de serviço.

6.2.1.2. Parâmetros operacionais

No anexo D, tabelas D.1 e D.2, encontram-se os resultados do trânsito de potência (valores de tensão nos nós e perdas nos ramos) da rede em análise na situação

inicial (antes da instalação de unidades GD), assim como para cada uma das soluções seleccionadas 2, 12, 33, 38 e 39 (após instalação de unidades GD).

Em termos operacionais, o perfil de tensões apresentado pela rede deve encontrar-se dentro do intervalo [0,93, 1,07] p.u.. No caso da rede em estudo, para o cenário escolhido, as tensões dos nós, principalmente nas extremidades dos ramos, encontram-se afastadas do limite inferior do intervalo. A instalação de GD, assim como a compensação de energia reactiva, permite melhorar o perfil de tensões da rede, trazendo-o para o intervalo pretendido. De notar que as soluções em que a tensão de algum nó se encontre fora deste intervalo são consideradas não admissíveis. Em relação ao perfil de tensões, as soluções seleccionadas representam uma melhoria significativa, como se pode verificar nas tabelas do anexo D. O valor da tensão mais afastado do limite inferior do intervalo admissível é o do extremo do alimentador principal, no nó 32. Na tabela 6.8 é apresentada uma comparação entre os desvios de tensão no nó 32 antes da instalação das unidades GD e para as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 (após instalação de unidades GD).

	Antes da instalação de GD	**Solução 2**	**Solução 12**	**Solução 33**	**Solução 38**	**Solução 39**
Desvio de tensão (p.u.), nó 32	0,130	0,068	0,054	0,004	0,037	0,023

Tabela 6.8 – Desvio de tensão no nó 32 antes da instalação das unidades GD e para as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 da rede de 94 nós.

Em relação às perdas em potência activa, a sua redução global, em relação ao cenário em que não existe qualquer equipamento instalado, é apresentada na Tabela 6.9.

	Solução 2	**Solução 12**	**Solução 33**	**Solução 38**	**Solução 39**
Redução de perdas activas (%)	61,6	75,1	98,4	85,9	94,7

Tabela 6.9 – Redução de perdas, em percentagem, para as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 (Figura 6.5) da rede de 94 nós.

Das tabelas 6.8 e 6.9 podemos verificar que existe uma melhoria significativa quer dos níveis de tensão nos nós da rede quer na redução das perdas à medida que as soluções se tornam mais caras, o que é sinónimo de mais unidades GD instaladas.

6.2.1.3. Atributo Potência Fornecida

Para uma tomada de uma decisão mais fundamentada, é posteriormente acrescentada a cada solução informação adicional sobre o atributo PF, como ilustrado na figura 6.5, associado ao raio do círculo que identifica a solução no gráfico. O decisor pode assim seleccionar a solução que melhores garantias dá em termos de número de consumidores alimentados, isto é, de continuidade de serviço.

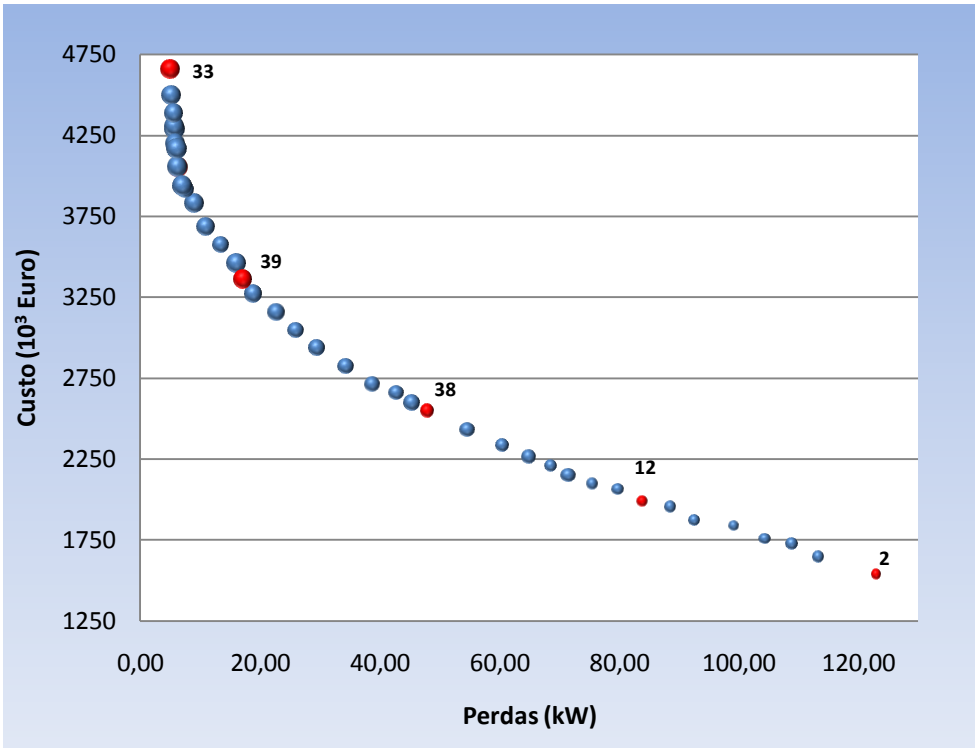

Figura 6.6 – População final (com atributo PF).

Como exemplo de soluções para a rede em estudo, foram seleccionadas as soluções 2, 12, 33, 38 e 39 indicadas na Figura 6.5. Na tabela 6.10 apresentam-se os valores do atributo PF para estas soluções.

Soluções	Potência Fornecida (kW)
2	950,0
12	1098,5
33	1900,0
38	1622,0
39	1873,6

Tabela 6.10 – Atributo potência fornecida associado a cada uma das soluções assinaladas na figura 6.5 da rede de 94 nós.

Por exemplo, se o decisor seleccionar a solução 33 sabe que à partida esta solução apresentará melhor atributo PF (1900 kW); no entanto, apresentará custos mais elevados e menores perdas do que as soluções 2, 12, 38 e 39, cujos valores do atributo PF são menores (tabela 6.10). No entanto, para estas soluções as funções objectivo custo e perdas apresentam piores valores.

6.2.1.4. Escolha de uma solução

Para uma melhor visualização da estrutura da solução optou-se por apresentar uma solução através da imagem esquemática da própria rede. Nesta mesma rede também se apresentam as zonas que a compõem, evidenciando a(s) que se encontra(m) em serviço perante o cenário de avarias gerado. Dada a dimensão da rede, apresenta-se apenas uma solução da rede estudada, neste caso a solução 39 (figura 6.7) dado que apresenta uma boa relação custo/perdas e um dos mais elevados valores do atributo PF.

Analisando a solução 39 em termos operacionais (perfil de tensões nos nós da rede), localização de DRA vs. zonas verifica-se que:

- Em relação ao perfil de tensões, o valor da tensão mais afastado do limite inferior do intervalo admissível é o do extremo do alimentador principal, no nó 32. Este valor apresenta um desvio de 0,13 p.u. antes da instalação das unidades GD, enquanto que após a instalação o seu valor é de apenas 0,023 p.u.;
- A localização dos DRA na rede, como podemos constatar na figura 6.7, é responsável pela criação de zonas, isto é, espaços físicos perfeitamente delimitados que, em caso de avarias, podem ser isolados. Na eventualidade da avaria se localizar numa zona não extrema de um determinado ramal, tal não significa que as zonas a jusante fiquem sem alimentação. Isto é, caso alguma dessas zonas disponha de GD ela pode funcionar como uma "ilha", alimentando todas as suas cargas ou, caso tal não seja possível, pelo menos uma parte delas. Se não for possível alimentar todas as cargas de uma zona proceder-se-á a deslastres aleatórios por prioridades. Estas zonas são, assim, responsáveis pelo atributo PF, não sendo o número de zonas proporcional ao maior ou menor valor do atributo PF face a uma determinada probabilidade de avarias. Isto significa, então, que a disponibilidade não está apenas dependente do número de zonas mas também se essas zonas dispõem ou

não de unidades GD e do cenário de avarias. Daí que solução 39 apresente o valor 1873,6 kW no atributo PF, dado que apenas as zonas 2, 3, 4 e 6 (sombreada) da figura 6.7 continuam a ser alimentadas. Também neste exemplo podemos constatar que apesar da zona 5 possuir unidades de GD instaladas, como esta é do tipo 3 (microturbina a gás) a sua potência é de 100kW. Dado que a carga dessa zona é maior (286kW), esta encontra-se fora de serviço, não contribuindo para uma maior disponibilidade do sistema.

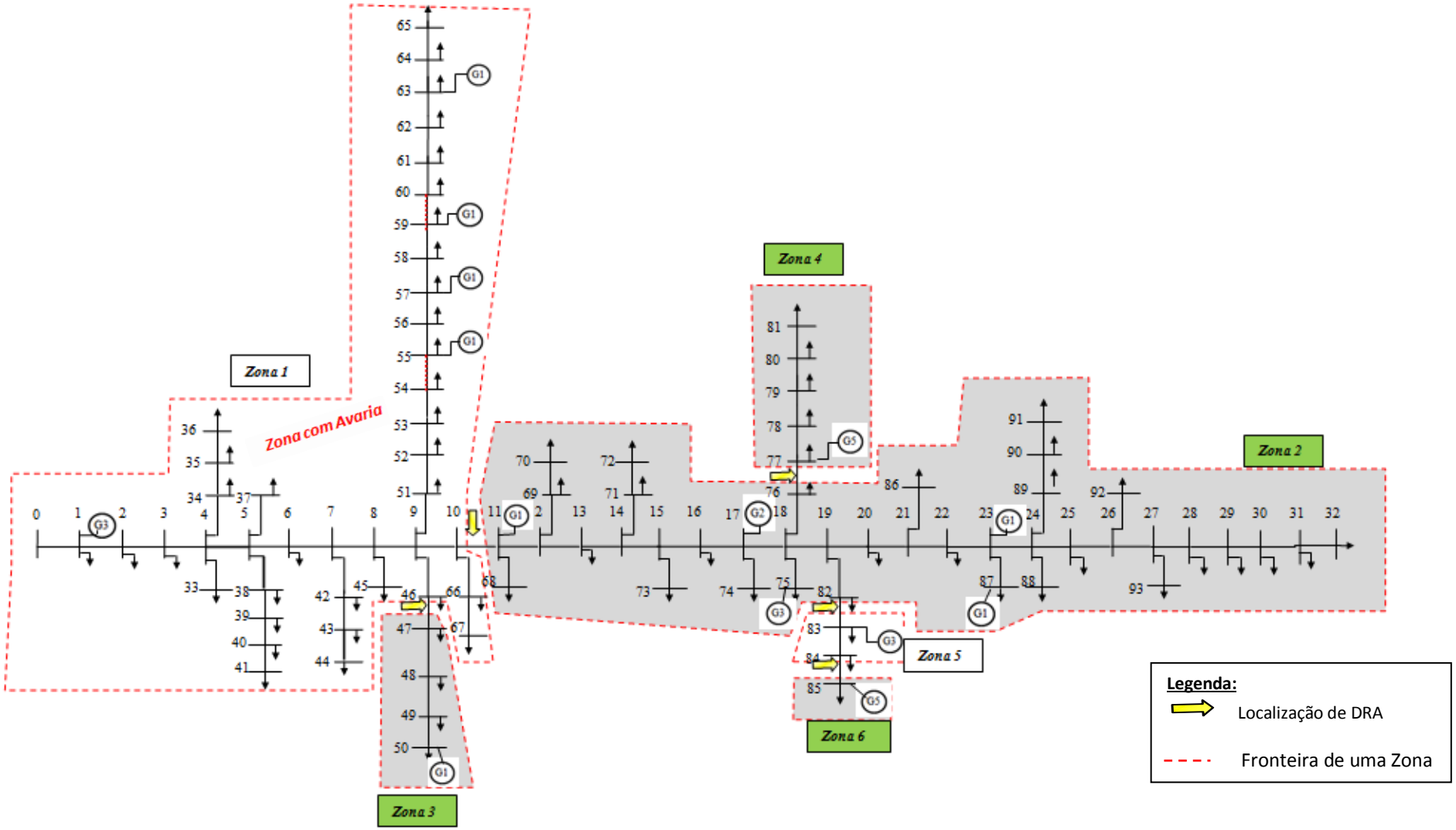

Figura 6.7 – Rede de 94 nós com DG, BCs, DRA e sinalização de avarias, solução 39.

6.2.1.5. Variações no algoritmo que conduziram à melhor frente óptima de Pareto

Com o intuito de adaptar o algoritmo às características da rede em estudo, algumas variantes das técnicas usadas foram também implementadas e testadas. Em particular, foram levadas a cabo experiências usando diferentes estratégias para criar a população inicial assim como tipos distintos de cruzamento.

A figura 6.8 permite-nos comparar a população final que apresentou os melhores resultados (NP=100, NP_S=40, E=4, k_{Torn}=2, 10000 gerações, p_m=0,1 e p_c=1) com a população inicial.

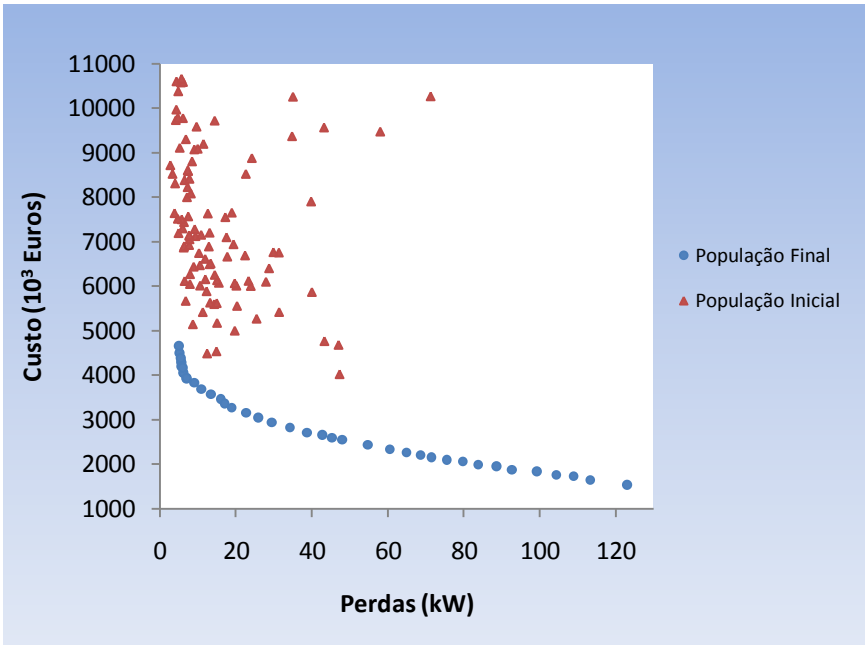

Figura 6.8 – População final versus população inicial

Para este problema específico, foram analisados três tipos de cruzamento: *um ponto*, *dois pontos* e *uniforme* com uma máscara gerada de forma aleatória. As experiências levadas a cabo indicaram que para qualquer um dos tipos de cruzamento, p_c=1, isto é, deve existir sempre cruzamento, conduzindo a uma maior diversidade de soluções e a uma convergência mais rápida. O *cruzamento de dois pontos de corte* produziu melhores resultados, como se pode constatar na figura 6.9.

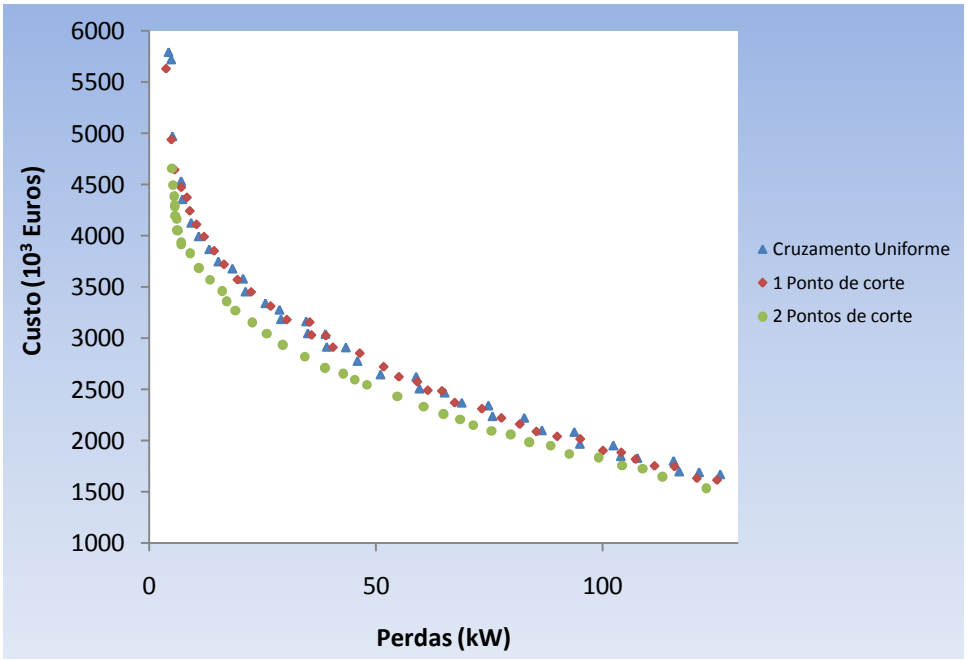

Figura 6.9 – Populações finais associadas aos melhores resultados dos vários tipos de cruzamento.

Foram também analisadas três estratégias para determinar a população inicial, que estão relacionadas com o tipo de solução:

A) Soluções Admissíveis e Não admissíveis;
B) Soluções Admissíveis (Dominadas e não dominadas);
C) Apenas Soluções Admissíveis não dominadas;

As populações iniciais que apresentaram melhores resultados foram as do tipo C). Como podemos verificar na figura 6.10, a frente óptima de Pareto determinada através deste algoritmo utilizando este tipo de população inicial dominava as frentes obtidas pelos outros dois tipos de estratégia.

A figura 6.10 mostra-nos as três frentes óptimas de Pareto associadas aos três tipos de população inicial, para o mesmo conjunto de parâmetros: NP=100; NP_S=40; E=4; k_{Torn}=2; 10000 gerações; p_m=0,1 e p_c=1.

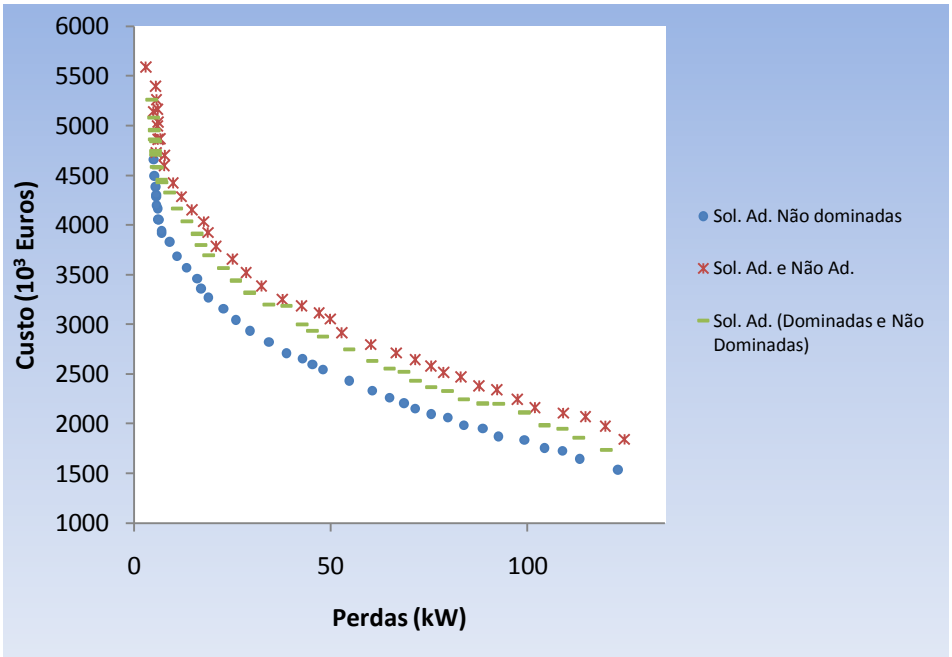

Figura 6.10 – Populações finais (usando o mesmo conjunto de parâmetros) para diferentes populações iniciais.

A figura 6.11 mostra as frentes óptimas de Pareto associadas aos melhores resultados para cada conjunto de valores dos parâmetros genéticos, *cruzamento de dois pontos* e população inicial constituída por *soluções admissíveis não dominadas* (entre todos os conjuntos testados):

- *Tipo A*: NP=100; NP_S=40; E=4; k_{Torn}=2; Nº de gerações =10000; p_m=0,1 e p_c=1;
- *Tipo B*: NP=40; NP_S=50; E=4; k_{Torn}=2; Nº de gerações =7500; p_m=0,1 e p_c=1;
- *Tipo C*: NP=30; NP_S=40; E=6; k_{Torn}=2; Nº de gerações =7500; p_m=0,1 e p_c=1;

Quanto à mutação, parâmetro que surge como um complemento ao efeito do operador cruzamento, o valor p_m=0,1 proporcionou a melhor diversidade de soluções e convergência do algoritmo. Valores inferiores a p_m=0,1 demonstraram variações pouco significativas em termos de perda de diversidade das soluções, enquanto que valores superiores a 0,1 apresentavam maior diversidade entre soluções e frentes pouco convergentes.

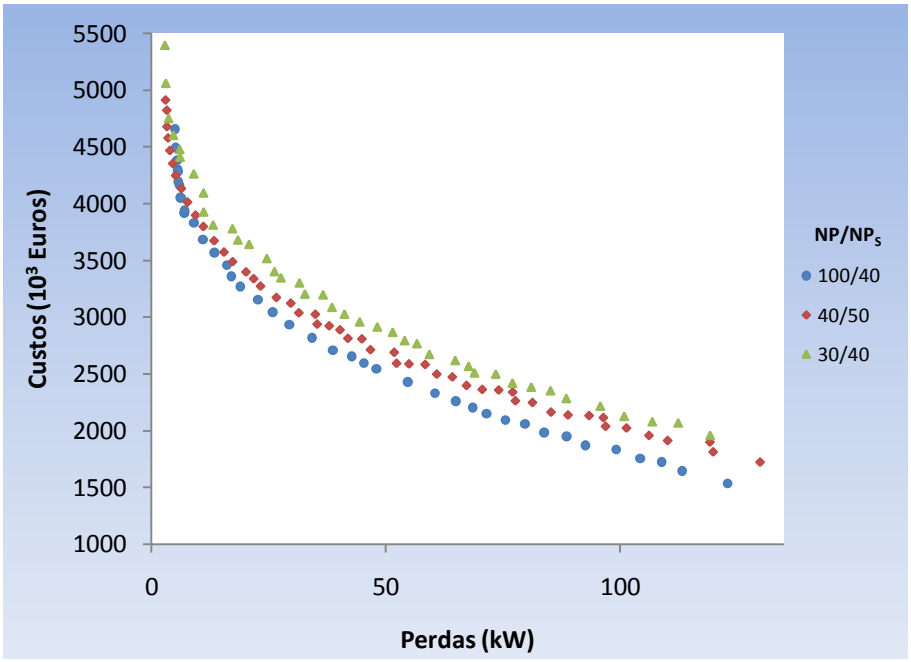

Figura 6.11 – Populações finais associadas aos melhores resultados obtidos.

No algoritmo foi embebido o conceito de robustez anteriormente apresentado. Apesar de não ser nosso objectivo analisar os seus parâmetros (p e η) na determinação da frente óptima de Pareto, a figura 6.12 mostra a frente não dominada obtida com os seguintes valores fixos para os parâmetros associados à análise de robustez:

– p = 100%, para qualquer tipo de soluções;

– h = 100;

– δ = 0,002, para a resistência e a reactância dos troços;

– δ = 0,02, para as potências activa e reactiva nos nós;

– η = 0,005, indica a diferença máxima permitida entre os valores das perdas de uma solução em dois cenários distintos, em que um deles é o cenário de referência;

– q = 1, para qualquer tipo de solução.

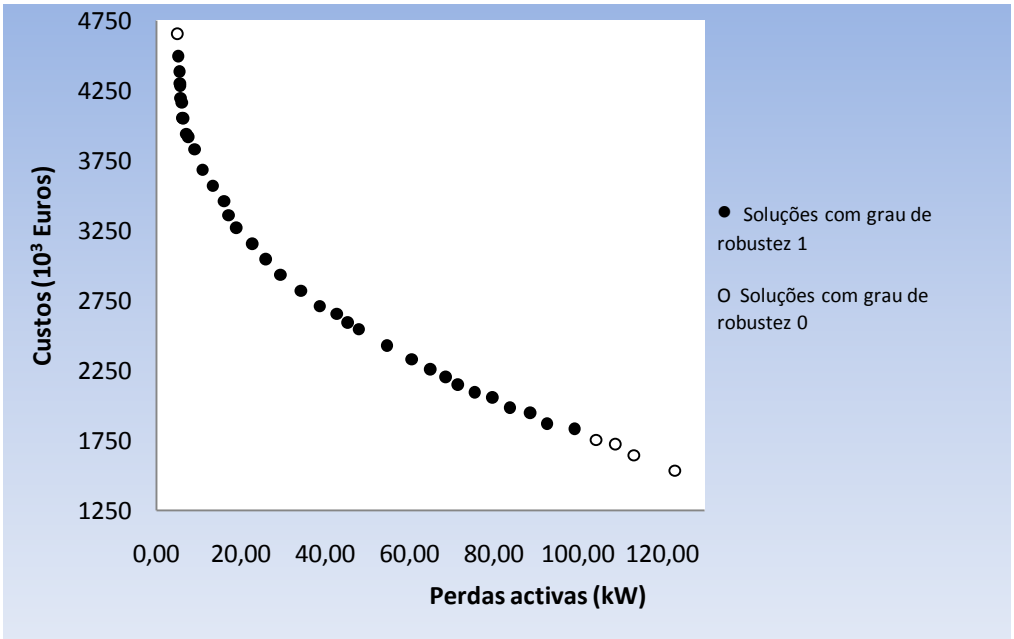

Figura 6.12 – Populações finais associadas aos melhores resultados (indicação das soluções por graus de robustez).

Para p= 100% a maioria das soluções tem um grau de robustez de valor 1 e apenas a solução de valor óptimo da função objectivo perdas e um pequeno grupo de soluções próximas do valor óptimo da função objectivo custo possuem um grau de robustez 0.

6.2.2. Rede de distribuição de 86 nós

Esta rede, tal como a de 94 nós, caracteriza-se por, em períodos de sobrecarga, como é o que está em estudo, apresentar um perfil de tensões em que a maioria dos nós também apresenta um valor abaixo dos 0,93 p.u., limite inferior do intervalo admissível para o valor da tensão, como se pode verificar na tabela D.6 do anexo D.

Para o cenário de carga escolhido, apresentam-se na Tabela 6.11 os valores das perdas da rede antes de qualquer instalação de GD, BCs e DRA.

Perdas activas (kW)	Perdas reactivas (kVAr)
903,21	1221,30

Tabela 6.11 – Perdas apresentadas pela rede portuguesa de 86 nós antes de qualquer simulação do modelo

Das várias simulações realizadas, com a rede de 86 nós, com diferentes parâmetros, os melhores resultados foram obtidos com NP=40, NP_S=50, E=2, k_{Torn}=2, 5000 gerações, p_m=0,1 e p_c=1. A figura 6.13 apresenta a frente de Pareto, referente à

população final (soluções a serem analisadas pelos responsáveis pela operação, gestão e manutenção da rede).

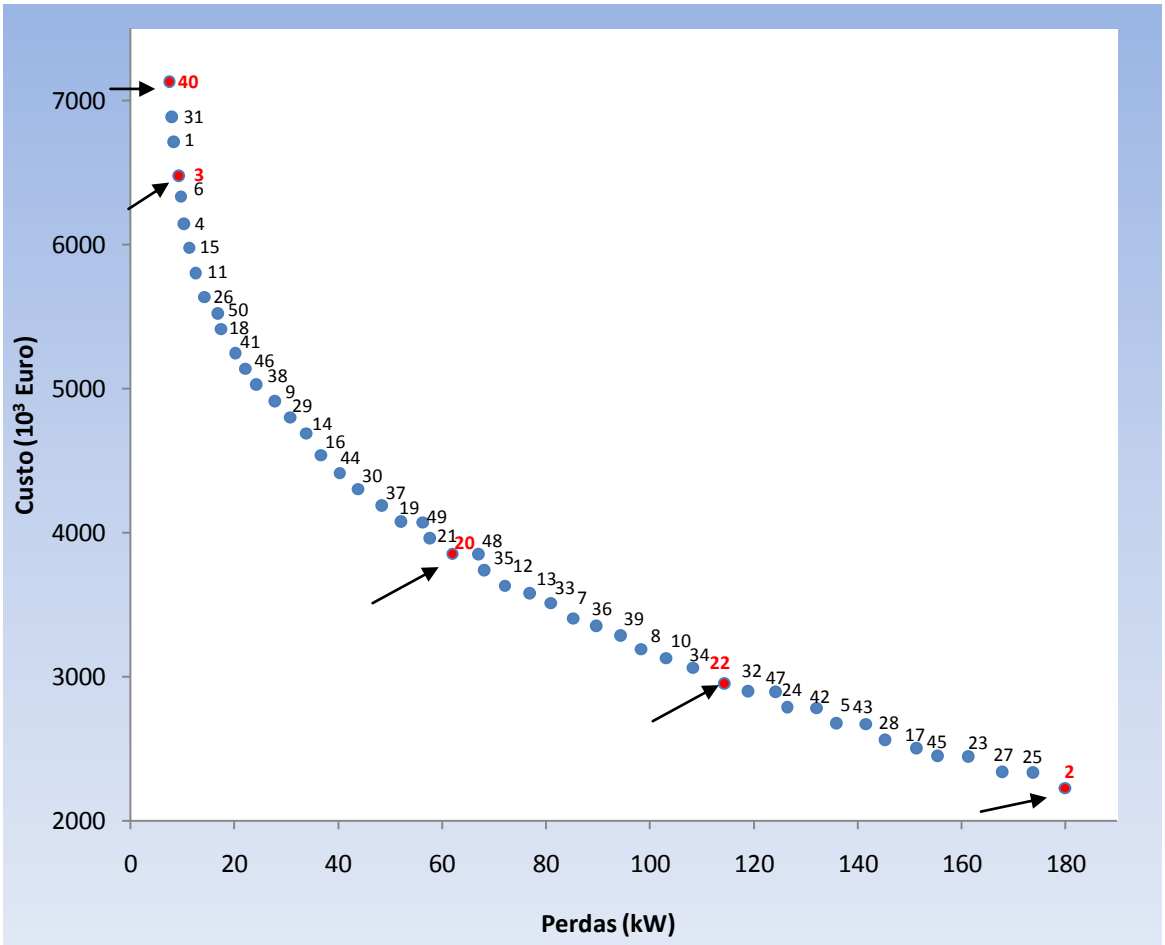

Figura 6.13 – População final com 50 soluções para a rede de 86 nós

6.2.2.1. Funções objectivo, estrutura de localização e dimensionamento e parâmetros operacionais

Da frente de Pareto apresentada na figura 6.13 foram analisadas as duas soluções extremas (2 e 40) que optimizam individualmente cada função objectivo e três soluções óptimas de Pareto intermédias em termos dos compromissos custo/perdas (3, 20 e 22).

Das soluções seleccionadas da figura 6.13, a solução 40 apresenta o maior custo (7130,3 milhares de euros) e as menores perdas (8,93 kW). No outro extremo, a solução 2 apresenta as maiores perdas, de 179,9 kW, e o menor custo, de 2226,6 milhares de euros.

Soluções	Custos (10^3 euros)	Perdas activas (kW)
2	2226,6	179,90
3	6478,6	9,26
20	3852,3	61,99
22	2953,9	114,29
40	7130,3	7,53

Tabela 6.12 – Funções objectivo das soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da rede de 86 nós.

Numa análise à estrutura dos vectores que indicam o nó da rede onde foram colocadas as unidades GD, as BCs e os DRA, tabela 6.13, podemos concluir que os maiores custos estão associados quer à instalação de mais equipamentos (GD e BCs), quer à instalação de unidades GD mais caras.

Na solução 40 são instaladas 26 unidades GD, das quais 23 são renováveis (16 MCI a biogás, 3 de biomassa e 3 eólicas e 1 solar fotovoltaica) e 3 não renováveis (3 microturbinas a gás). Nesta solução foram ainda instalados 11 BCs extra de vários tipos e 4 DRA, criando 5 zonas.

A solução 2 apresenta 9 unidades GD instaladas onde 8 são renováveis (7 MCI a biogás e uma a biomassa) e uma não renovável (microturbina a gás). São ainda instalados 11 BCs extra de vários tipos e 3 DRA criando 4 zonas.

As soluções 3, 20 e 22 apresentam 23, 15 e 11 unidades GD instaladas respectivamente. Na solução 3 são instalados 10 BCs, na solução 20 são instalados 13 BC e na 22 são instaladas 14 BCs. Ambas as soluções dispõem de 3 DRA, ou seja 4 zonas.

Das soluções analisadas, verificamos que as unidades GD mais instaladas são as do tipo 1, MCI a biogás por serem as que apresentam um custo por kW mais baixo e maior disponibilidade face às de fontes renováveis intermitentes. Nesta rede são instaladas, em número significativo, BCs extra, o que pode ser explicado através da fragilidade (parâmetros operacionais muito instáveis) que a rede apresenta nomeadamente no que respeita às perdas e níveis de tensão.

Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA) (nós 0–42)

Sol.	Tec.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
3	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	1
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	1
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
40	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(nós 43–85)

Sol.	Tec.	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
2	BC	0	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	3	0	0	1	0	0	5	3	5	2	0	1	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
3	BC	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
20	BC	1	0	2	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
22	BC	1	2	3	3	2	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	3	6	0	1	0	0	5	3	5	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
40	BC	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabela 6.13 – Vectores que contêm os locais de instalação e os tipos de GD, BCs e DRA das soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da população final.

6.2.2.2. Parâmetros Operacionais

No anexo D, tabelas D.5 e D.6, encontram-se os valores de tensão apresentados pelos nós da rede e os valores das perdas nos troços, para as soluções seleccionadas e para o caso em que não existe qualquer equipamento instalado.

Nesta rede o valor da tensão mais afastado do limite inferior do intervalo admissível é, entre outros, o do extremo do alimentador derivado número 12, no nó 80. Na tabela 6.14 é apresentada uma comparação entre os desvios de tensão no nó 80, antes da instalação das unidades GD e após a sua instalação no caso das soluções 2, 3, 20, 22 e 40. É notório que antes da instalação das unidades GD o valor da tensão nesse nó se encontrava fora dos limites admissíveis.

	Antes da instalação de GD	**Solução 2**	**Solução 3**	**Solução 20**	**Solução 22**	**Solução 40**
Desvio de tensão (p.u.), nó 80	0,180	0,054	0,002	0,028	0,038	0,002

Tabela 6.14 – Desvio de tensão no nó 80 antes da instalação das unidades GD para as soluções 2, 3, 20, 22 e 40 da rede de 86 nós.

A redução global das perdas em potência activa, em relação ao cenário em que não existe qualquer equipamento instalado, é apresentada na tabela 6.15.

	Solução 2	**Solução 3**	**Solução 20**	**Solução 22**	**Solução 40**
Redução de perdas, potência activa (%)	80,1	98,9	93,1	87,3	99,2

Tabela 6.15 – Redução de perdas, em percentagem, para as soluções exemplo (Figura 6.13) da rede portuguesa de 86 nós.

Das tabelas 6.14 e 6.15 podemos verificar que existe uma melhoria significativa, quer dos níveis de tensão nos nós da rede, quer na redução das perdas, à medida que as soluções se tornam mais caras, o que é sinónimo de mais unidades GD instaladas.

6.2.2.3. Atributo Potência Fornecida

Na figura 6.14 encontra-se representado o atributo PF, identificado pelos raios das circunferências de cada solução.

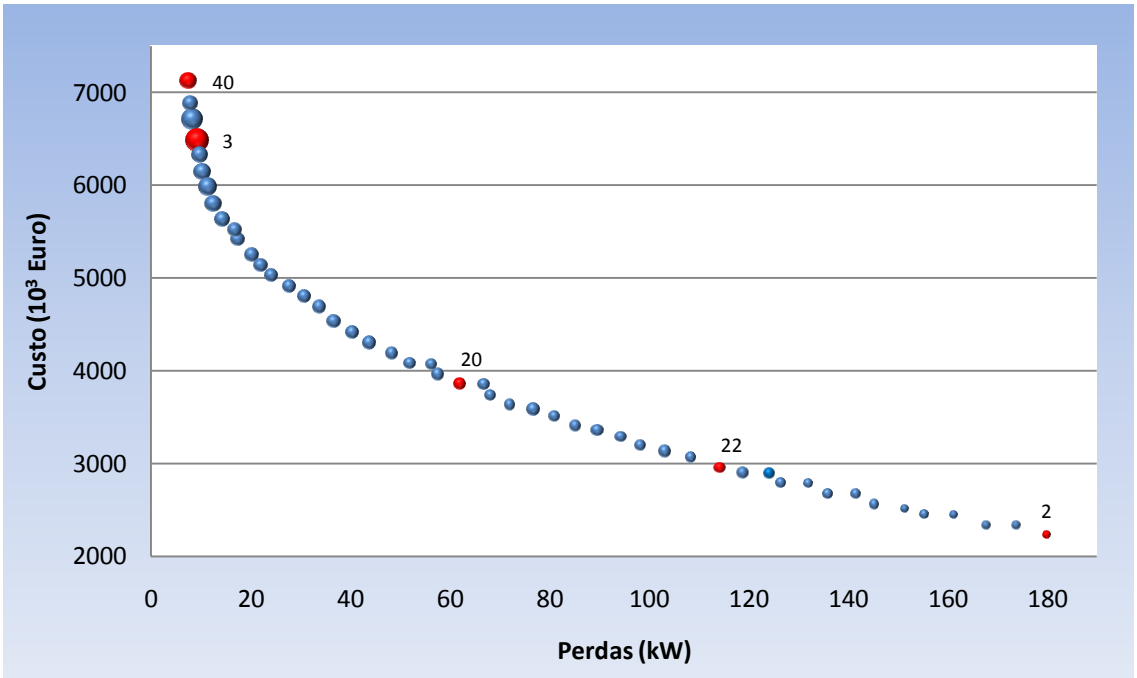

Figura 6.14 – População final evidenciando o atributo Potência fornecida

Para as soluções seleccionadas 2, 3, 20, 22 e 40, alvo de estudo desta rede, indicadas na figura 6.14, apresenta-se na tabela 6.16 os seus valores do atributo PF.

Soluções	Atributo PF (kW)
2	1600,0
3	4667,7
20	2350,0
22	2100,0
40	3215,2

Tabela 6.16 – Atributo PF associado a cada uma das soluções seleccionadas (figura 6.14) da rede de 86 nós.

Das cinco soluções estudadas, a solução 3 apresenta o melhor valor para atributo PF (4667,7 kW); no entanto, apresenta custos mais elevados e menores perdas do que, por exemplo, a solução 22 que apresenta um valor do atributo PF de 2100 kW mas com custos muito menores e perdas mais elevadas.

6.2.2.4. Solução a implementar

A rede de 86 nós, como foi referido anteriormente, seria útil para a análise da eficácia do modelo desenvolvido, dado que poderíamos comparar os valores obtidos pelo modelo com os dados fornecidos, isto é, o custo e a redução de perdas resultantes da intervenção de que a rede tinha sido alvo. Esta comparação, contudo, não é completamente justa, dado que estamos a comparar realidades distintas, i.e., modelos diferentes: o modelo proposto visa a localização e dimensionamento de equipamentos GD, BCs e DRA; em contrapartida, o modelo utilizado contempla também o reforço de alguns troços. No entanto, foi possível analisar a discrepância entre os valores obtidos e localizar em termos de custos as soluções mais próximas da que foi implementada na realidade, realçando as potenciais contribuições do modelo proposto nesta tese.

Tal como nos foi fornecida, a rede de 86 nós apresentava problemas ao nível das tensões em alguns nós, abaixo dos limites impostos [0,93, 1,07] p.u, o que significa que havia sobrecarga em alguns troços. A rede foi alvo de intervenção e sofreu algumas alterações. Nalguns troços as linhas foram duplicadas e noutros foram utilizadas linhas com diferentes secções, tendo ainda sido instalados BCs e um parque eólico. Os dados da rede não especificavam os troços que tinham sido modificados, nem os nós onde foram instalados as BCs e o parque eólico. Apenas foram fornecidos os seguintes dados indicativos, apresentados na tabela 6.17.

Investimento (milhares de euros)	Perdas activas (kW)	Perdas reactivas (kVAr)
6320,0	330,00	320,00

Tabela 6.17 – Valor indicativo do investimento realizado, após a intervenção, no reforço da rede de 86 nós e respectivas perdas.

O investimento foi superior a uma grande parte das soluções apresentadas pelo modelo desenvolvido, como se pode ver nas tabelas D.7 e D.8 do anexo D. Por exemplo, das soluções 2, 3, 20, 22 e 40 podemos constatar que as soluções 3 e 40 representam investimentos de 6478,6 e 7130,3 milhares de Euros respectivamente, que se encontram acima do investimento realizado de 6320,0 milhares de Euros. No entanto, as soluções 20 e 22 apresentam valores francamente inferiores 3852,3 e 2953,9 milhares de Euros, respectivamente.

Quanto às perdas, as soluções geradas pelo modelo apresentam valores melhores em todas as soluções. No caso das soluções em estudo podemos ver, na tabela 6.15, que a solução que apresenta piores resultados é a 22, com uma redução de 87,3% nas perdas activas, enquanto que a redução conseguida pelo reforço se situa nos 63,5% para as perdas activas.

Com base nestes resultados, o agente de decisão poderia ter optado pela escolha da solução 20 ou 22, dado que apresenta melhores valores do que os resultantes da intervenção na rede. No entanto, analisando o atributo PF verifica-se que este apresenta valores de 2350 kW e 2100 kW respectivamente, para o cenário de avarias em causa. Assim, a escolha poderia recair sobre uma das soluções seleccionadas mais cara mas com um melhor atributo PF, a solução 3. Neste caso, os custos iriam ser de 6478,6 milhares de Euros, 2,5% mais elevados e perdas 35,4% inferiores do que o reforço realizado, e apresentando um valor de 4667,7 kW para atributo PF. No caso da rede sujeita a reforço não dispúnhamos de qualquer informação referente ao atributo PF, para estabelecer uma comparação. O modelo utilizado não contemplava o funcionamento em ilhas nem a instalação de DRA, isto é, caso ocorresse uma avaria em qualquer ponto da rede, todas as cargas desde a subestação deixariam de ser alimentadas.

De modo a ilustrar de forma legível a rede eléctrica alvo de instalação de GD, BCs e DRA, apresenta-se na figura 6.15 a solução 3 numa imagem da própria rede.

Nesta rede o valor da tensão mais afastado do limite inferior do intervalo admissível, como já foi referido é, entre outros, o do extremo do alimentador derivado número 12, no nó 80. Este valor apresenta um desvio de 0,18 p.u. antes da instalação dos equipamentos, enquanto que após a sua instalação, e para a solução 3, é de apenas 0,002 p.u.

No que respeita às zonas, na solução 3 da rede de 86 nós, para o cenário de avarias considerado, apenas as zonas sombreadas (zonas 2, 3 e 4) continuam a ser alimentadas. O valor do atributo PF é de 4667,7kW.

Apesar de as zonas 2 e 3 possuírem GD instalada, não alimentam as suas cargas na totalidade, dado que a potência solicitada pelas cargas é maior do que a fornecida pelas tecnologias DG aí instaladas, dando origem ao deslastre de cargas.

Por esta razão, há uma diferença entre os valores das cargas nessas zonas e o valor da potência fornecida, como podemos ver na tabela 6.18.

Zonas	Carga (kW)	Potência activa Fornecida (kW)
2	5083,1	3450,0
3	1433,0	1000,0

Tabela 6.18 – Zonas fora de serviço devido à potência fornecida ser menor do que a consumida.

Nestes casos o deslastre é realizado de acordo com a prioridade de cada carga. Se duas cargas possuem a mesma prioridade em termos de deslastre, para minimizar o impacto em termos de potência não fornecida, é realizado o deslastre da menor carga. Caso as cargas fossem de valores muito próximos, o deslastre seria aleatório.

Quanto à zona 4, a unidade GD aí instalada (Tipo 5) apresenta uma potência instalada de 250kW, superior à carga 68,4kW, não sendo necessário qualquer deslastre da carga. Desta forma as zonas continuariam em funcionamento em "ilha", alimentando apenas as cargas possíveis.

Como podemos verificar, a soma das potências das unidades GD das zonas não afectadas pela avaria totaliza 4700 kW. No entanto, o valor do atributo PF apresentado é de 4667,7 kW, devendo-se esta diferença ao deslastre das cargas.

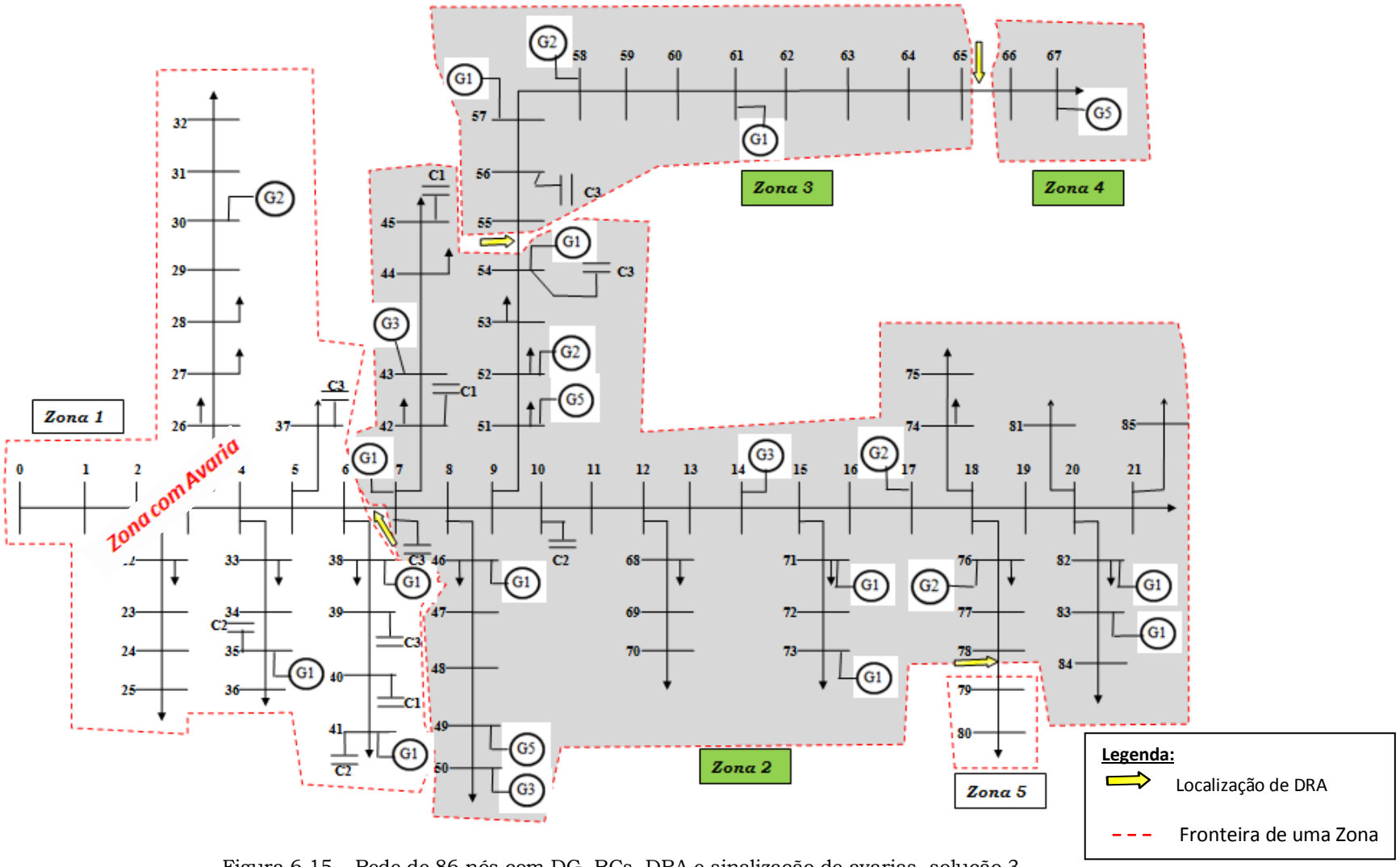

Figura 6.15 – Rede de 86 nós com DG, BCs, DRA e sinalização de avarias, solução 3.

6.2.2.5. Variações no algoritmo que conduziram à melhor frente óptima de Pareto

A figura 6.16 permite-nos comparar a população final que apresentou os melhores resultados (*NP*=40; NP_S=50; *E=2;* k_{Torn}=2; 5000 gerações; p_m=0,1 e p_c=1) com a sua população inicial.

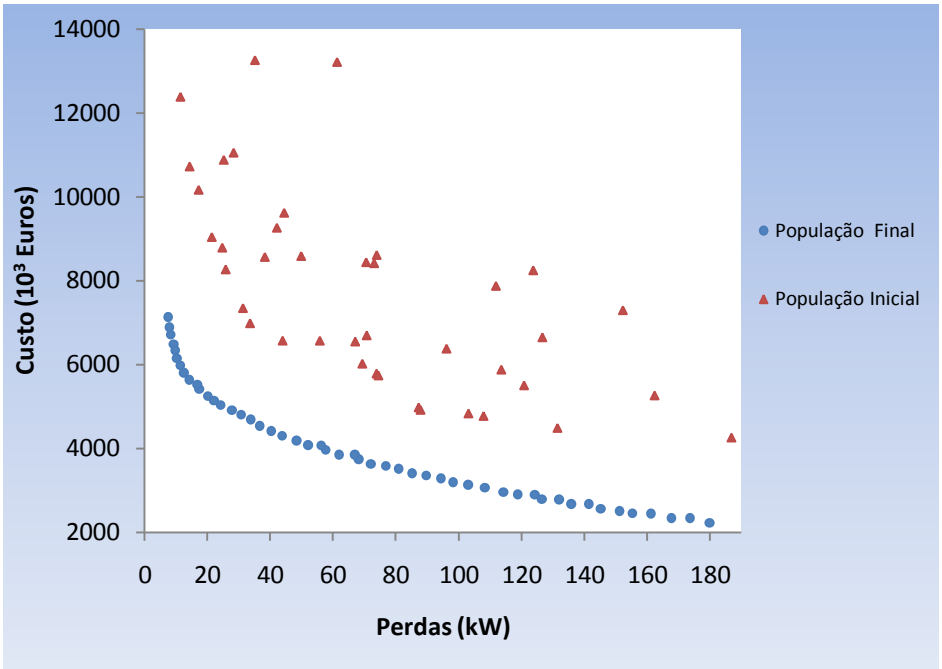

Figura 6.16 – População final versus população inicial

Tal como na rede de 94 nós, e pelos mesmos motivos, os parâmetros cruzamento e mutação que apresentaram melhores resultados foram p_c=1 e p_m=0,1.

Quanto ao cruzamento, dos três tipos analisados (*um ponto*, *dois pontos* e *uniforme* com uma máscara gerada de forma aleatória) as experiências levadas a cabo divergem do caso anterior (rede de 94 nós), apresentando o *cruzamento uniforme* uma melhor frente, como se pode verificar na figura 6.17.

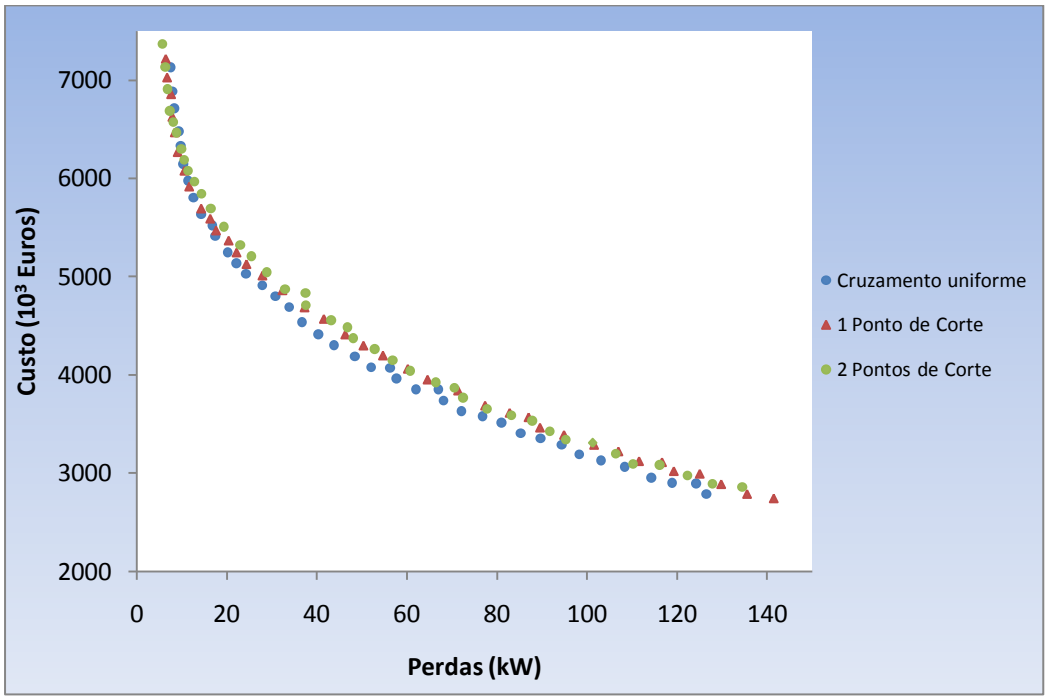

Figura 6.17 – Populações finais associadas aos melhores resultados dos vários tipos e cruzamento.

Nesta rede, foram também analisadas três estratégias diferentes relacionadas com o tipo de soluções que pertencem à população:

A) Soluções Admissíveis e Não admissíveis;

B) Soluções Admissíveis (Dominadas e não dominadas);

C) Apenas Soluções Admissíveis não dominadas.

As populações iniciais que apresentaram melhores resultados, tal como na rede de 94 nós, foram as do tipo C). Como podemos verificar, a frente óptima de Pareto determinada através deste algoritmo utilizando este tipo de população inicial dominava as frentes obtidas pelos outros dois tipos de estratégia, como nos mostra a figura 6.18.

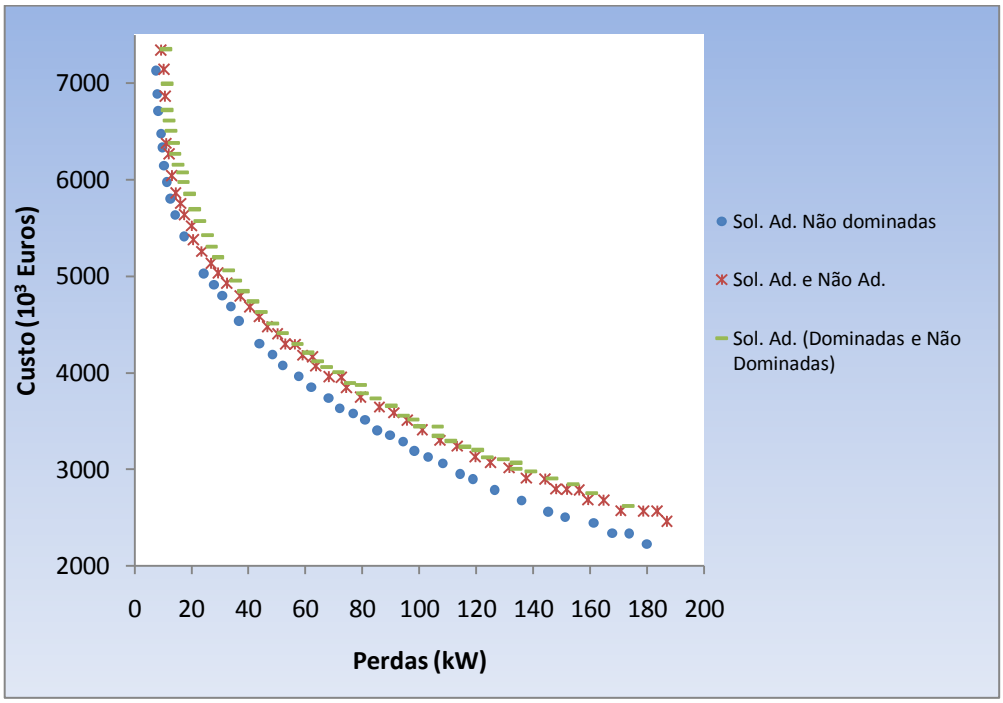

Figura 6.18 – Populações finais (Usando o mesmo conjunto de parâmetros: NP=40; NP_S=50; E=2; k_{Tom}=2; 5000 gerações; p_m=0,1 e p_c=1)

A figura 6.19 mostra-nos as três frentes óptimas de Pareto associadas aos melhores resultados para cada tipo de população inicial (para todos os parâmetros testados):

- *Tipo A*: NP=20; NP_S=40; E=2; k_{Torn}=2; Nº de gerações =7500; p_m=0,1 e p_c=1;
- *Tipo B*: NP=40; NP_S=50; E=2; k_{Torn}=2; Nº de gerações =5000; p_m=0,1 e p_c=1;
- *Tipo C*: NP=30; NP_S=40; E=4; k_{Torn}=2; Nº de gerações =5000; p_m=0,1 e p_c=1;

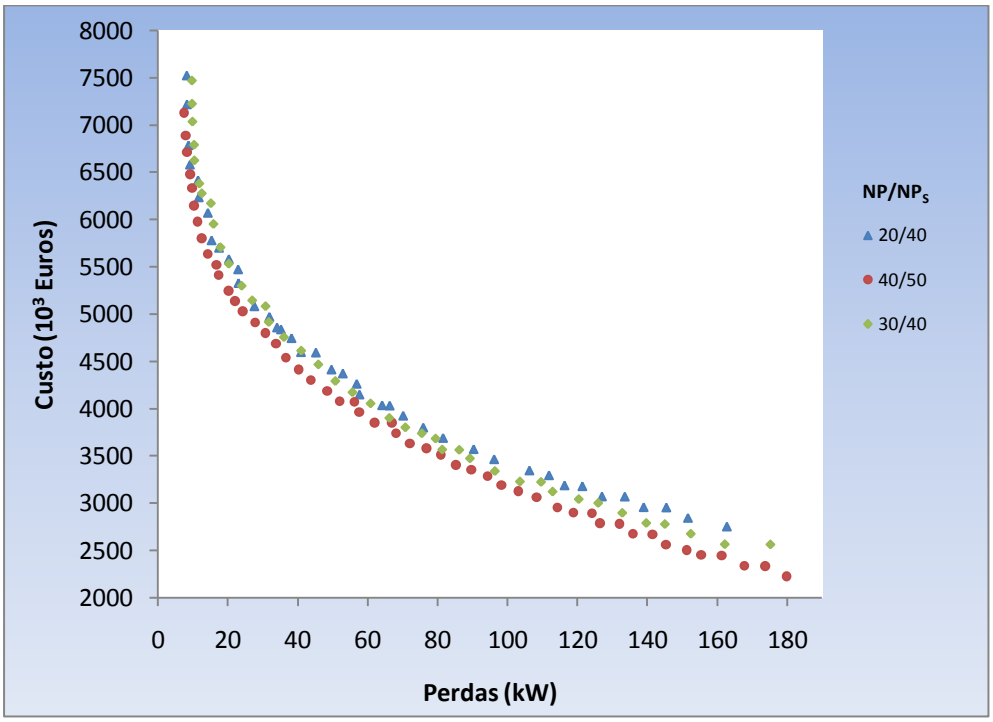

Figura 6.19 – Populações Finais associadas aos melhores resultados obtidos.

Foram considerados os mesmos valores fixos para os parâmetros associados à análise de robustez:

– p = 100%, para qualquer tipo de soluções;

– h = 100;

– δ = 0,002, para a resistência e a reactância dos troços;

– δ = 0,02, para as potências activa e reactiva nos nós;

– η = 0,005, indica a diferença máxima permitida entre os valores das perdas de uma solução em dois cenários distintos, em que um deles é o cenário de referência;

– q = 1, para qualquer tipo de solução:

A figura 6.20 mostra a frente não dominada fazendo referências às soluções por graus de robustez.

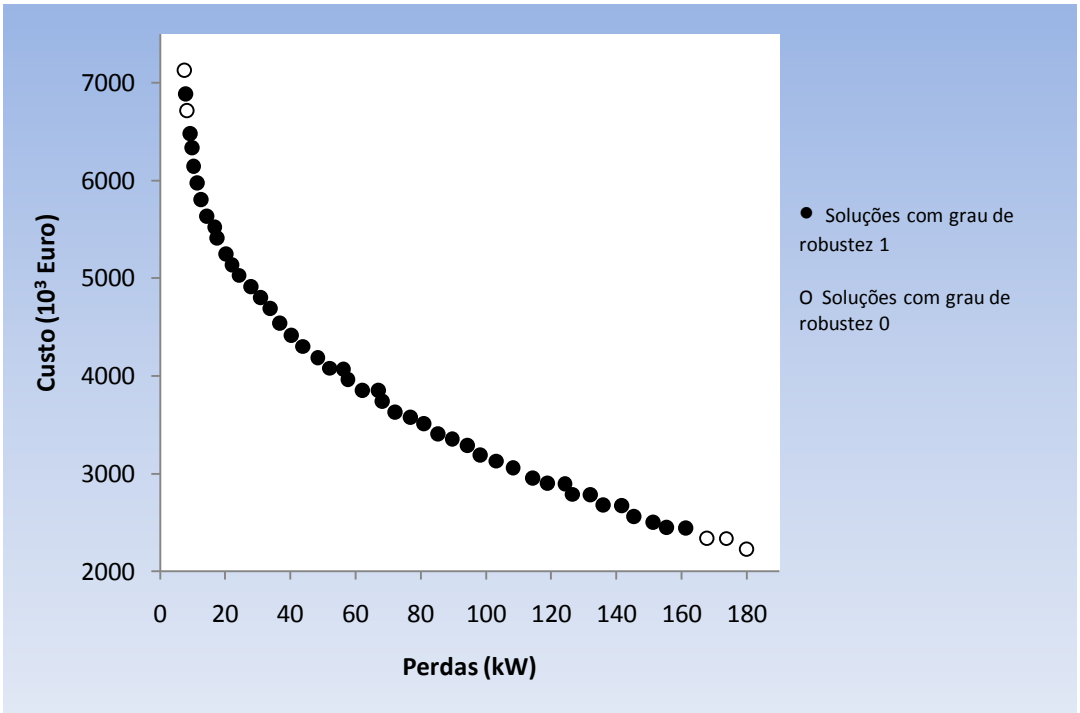

Figura 6.20 – Populações finais associadas aos melhores resultados (indicação das soluções por graus de robustez).

Para *p*= 100% a maioria das soluções tem um grau de robustez de valor 1 e apenas um pequeno grupo de soluções próximas do valor óptimo de cada função objectivo possui um grau de robustez 0.

6.3. Discussão de resultados

Para o cenário de carga em estudo, a rede de 94 nós apresenta um volume de perdas de 320 kW. Apesar de este valor poder parecer elevado, se se considerarem as dimensões da rede as perdas não representam uma parcela muito grande relativamente à potência global de carga da rede de 4797 kW. Neste caso, a redução de perdas conseguida pela instalação de GD e BCs situa-se entre 98,4% e os 61,67%.

No caso da rede de 86 nós, as perdas são de 903 kW. Apesar das dimensões da rede o volume de perdas é elevado, relativamente à potência global de carga da rede de 8893 kW. Neste caso, a redução de perdas conseguida pela instalação de GD e BCs situa-se entre 99% e 80,1%.

A colocação adequada de GD e BCs tem vantagens significativas do ponto de vista de redução de perdas em qualquer uma das redes. Em alguns casos as perdas diminuem para um valor inferior a metade das que a rede apresenta inicialmente. A aplicação computacional desenvolvida apresenta um conjunto de soluções diversificadas que permitem a um decisor escolher uma solução de compromisso entre o investimento e a redução de perdas na rede eléctrica, usando ainda a potência fornecida como um atributo adicional para avaliar o mérito das soluções.

A melhoria do perfil de tensões é uma consequência da instalação de GD e BCs nas redes e da redução da amplitude da corrente nas linhas. Esta melhoria é visível em qualquer das redes em estudo. Como indicador da melhoria global do perfil de tensões do sistema, pode considerar-se a distância Euclideana ao perfil "ideal" em que se consideram todos os nós com a tensão de 1 p.u..

Na tabela 6.19 encontram-se os valores deste indicador para rede de 94 nós para as soluções seleccionadas.

	Sem Instalação	**Solução 2**	**Solução 12**	**Solução 33**	**Solução 38**	**Solução 39**
Distância Euclideana	0,892	0,521	0,414	0,0267	0,293	0,168

Tabela 6.19 – Indicadores das melhorias obtidas na tensão da rede de 94 nós.

De facto, o perfil de tensões desta rede sem qualquer instalação de GD e BC é muito abaixo do desejável quando se pretende um serviço de qualidade. De notar que a distância Euclideana, que é utilizada como indicador da qualidade da solução relativamente ao perfil de tensões, passou de aproximadamente 0,89 (da situação inicial antes da instalação de qualquer equipamento) para 0,52 no caso da pior solução das apresentadas 2, 12, 33, 38 e 39, após a instalação dos equipamentos (solução 12).

Em relação à rede de 86 nós e como podemos constatar na tabela 6.20, o perfil de tensões antes de qualquer instalação afastava-se muito dos seus limites (7% em torno de 1 p.u.).

	Sem Instalação	**Solução 2**	**Solução 3**	**Solução 20**	**Solução 22**	**Solução 40**
Distância Euclideana	1,206	0,405	0,031	0,196	0,281	0,029

Tabela 6.20 – Indicadores das melhorias obtidas na tensão da rede de 86 nós.

Após a instalação de GD e BCs este indicador passou de 1,206 sem qualquer tipo de instalação para 0,405 para o caso da solução 2, que é a pior de soluções ilustradas.

Comparando a tabela 6.19 com a tabela 6.8 e a tabela 6.20 com a tabela 6.15, pode-se concluir que existe uma relação entre o perfil de tensões e as perdas, isto é, perdas maiores resultam em piores perfis de tensão.

Os valores da distância Euclideana podem servir ao decisor como um indicador adicional da qualidade da solução. Isto é, a solução com este indicador de menor valor é sinónimo de que a tensão, apesar de se situar dentro do intervalo, se encontra mais próxima de 1 p.u.

O atributo PF está dependente simultaneamente da colocação de GD, DRA e da localização das avarias. Isto é, a localização de DRA permite que a rede possa ser dividida fisicamente em zonas. A localização de GD nessas zonas oferece maiores possibilidades ao atributo PF de apresentar melhores valores face a um determinado cenário de avarias gerado. Podemos, assim, concluir que as soluções com melhores valores deste atributo estão associadas a uma localização mais uniforme de GD pelas diferentes zonas. Este atributo constitui uma informação adicional para o decisor quando a análise do *trade-off* custo/perdas é julgado insuficiente.

Em relação às duas redes em estudo verificou-se que na rede de 86 nós as soluções apontavam para investimentos maiores comparativamente com a rede de 94 nós. Tal deve-se, por um lado, à debilidade em termos de qualidade de serviço por ela apresentado, com tensões nos barramentos fora dos limites impostos na regulamentação, e por outro, devido à maior potência.

Em relação aos parâmetros do algoritmo para cada um dos casos, rede de 94 e 86 nós, podemos verificar que, dependendo das características das redes, a afinação dos parâmetros conduz a valores distintos. As principais diferenças para os melhores resultados obtidos residem na dimensão das populações e no tipo de cruzamento. Enquanto que a rede de 94 nós apresentou uma melhor frente para uma relação população inicial vs. população final (100/40) e um cruzamento de dois pontos de corte, a rede de 86 nós apresentou uma melhor frente para uma relação população inicial vs. população final (40/50) e um cruzamento uniforme. No

que diz respeito à robustez e para os valores dos parâmetros fixos (níveis máximos de exigência do AD), a selecção de soluções deve evitar as que se encontram na extremidade da frente com valores muito próximos dos melhores valores das funções objectivo custos e perdas e privilegiar soluções mais equilibradas.

6.4. Conclusão

Apresentou-se neste capítulo a descrição da ferramenta computacional para localização de GD, BCs e DRA em redes de distribuição, bem com a sua aplicação a duas redes de distribuição reais.

Com a apresentação destes estudos de casos verificou-se a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida, evidenciando as vantagens da colocação adequada de GD, BCs e DRA nos nós da rede de distribuição: a redução das perdas globais da rede eléctrica, a melhoria do nível da tensão nos barramentos e da potência fornecida face à ocorrência de avarias.

A ferramenta desenvolvida apresenta a vantagem de determinar as soluções distinguindo o investimento necessário da redução de perdas no âmbito de uma abordagem multi-objectivo. As abordagens que atribuem um valor monetário às perdas e fornecem apenas um valor para o custo mínimo, privam o decisor de informação importante na tomada de decisões no que diz respeito aos *trade-offs* envolvidos. Para além da informação das perdas e custos, a cada solução está também associado um atributo adicional PF para um cenário de avarias, que poderá auxiliar o AD no processo de escolha de uma solução a implementar fornecendo informação adicional sobre o mérito das soluções face à continuidade de serviço.

Verificou-se também que para um mesmo problema (localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição), cada rede é uma realidade distinta dado que as melhores soluções são função de diferentes afinações nos parâmetros do AG.

7. CONCLUSÕES E PISTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

A GD, embora não possa ser entendida como uma alternativa capaz de substituir integralmente a GC (Geração Centralizada), representa uma solução inteiramente complementar à GC na medida em que traz benefícios locais (no local onde ocorre a injecção de potência no sistema) e outros que se manifestam pela rede de distribuição e por toda a rede de transmissão. A aposta em GD utilizando uma grande diversidade de fontes de energia, fundamentalmente renováveis, é um importante contributo para uma menor dependência de fontes de energia não renovável e a consequente redução das emissões de gases de efeito de estufa. Dada a modularidade, de algumas tecnologias de GD, podem facilmente ser ampliadas em termos de capacidade para fazer face ao crescimento da procura. A sua localização de forma distribuída é muito importante, dado que se forem convenientemente localizadas e dimensionadas podem minimizar os efeitos causados pelas interrupções de abastecimento devido a avarias na rede, pelas perdas na rede e adiar a eventual necessidade de expansão e reforço da rede face ao crescimento da procura.

É neste ambiente, favorável à implantação de novos empreendimentos de GD, que se desenvolveram as contribuições deste trabalho, indicando diferentes formas de considerar opções GD na etapa de planeamento da expansão dos sistemas eléctricos. A GD pode dar resposta a uma parte significativa da procura como, por exemplo, a um conjunto de consumidores de um alimentador ou de uma subestação, ou a um conjunto pequeno ou até mesmo isolado de consumidores.

Ao longo do texto foram sendo apresentadas as conclusões principais de cada um dos capítulos, sendo neste capítulo revistas apenas as consideradas mais importantes.

O trabalho desenrolou-se segundo um fio condutor que procurava apresentar uma solução alternativa às usualmente utilizadas para a identificação de estratégias de instalação de GD em redes. A localização e dimensionamento das unidades GD e BCs é uma questão de carácter intrinsecamente multi-objectivo, sendo necessária a avaliação dos impactos ao nível do consumidor e do fornecedor do serviço de energia.

Perante os objectivos em causa, o processo de identificação dos locais de instalação e o dimensionamento das unidades GD resulta numa tarefa complexa, nomeadamente devido ao seu carácter combinatório e ao facto de dispormos de várias tecnologias, cada uma dependendo de questões como a fonte de energia (variável de local para local) no caso das renováveis, das cargas (cargas prioritárias, exigências de continuidade/qualidade da energia) e da própria estabilidade da rede (perfil de tensão, ...).

Os AGs, enquanto ferramentas de pesquisa e optimização, são adequados para problemas com objectivos múltiplos e potencialmente conflituantes, especialmente os de natureza combinatória. O facto de trabalharem, em cada geração, com um conjunto de soluções dá-lhes uma perspectiva global ao permitir identificar potenciais soluções em diferentes regiões do espaço de pesquisa. A sua flexibilidade e generalidade exigem que sejam adaptados ao problema em questão através de uma codificação das soluções e de uma parametrização adequada. Os métodos de selecção e os operadores genéticos garantem a criação de descendentes mais aptos e a variabilidade genética dos indivíduos criados, além de evitar o problema de mínimos locais.

A metodologia aqui proposta foi no sentido de se obter um conjunto de soluções constituindo uma frente óptima de Pareto, considerando múltiplos critérios de avaliação, tais como a minimização das perdas activas e dos custos das unidades GD, BCs e DRA. O AD, além dos valores das funções objectivo, dispõe de um conjunto de indicadores auxiliares com informação adicional, embora não incluídos no modelo matemático, isto é, são calculados à posteriori, para auxiliar o processo de escolha de uma solução a implementar, como o caso da distância Euclideana da

tensão nos nós da rede ao valor de referência e o atributo PF. O atributo PF está dependente simultaneamente da colocação de GD, DRA e da localização das avarias. A localização de DRA permite que a rede possa ser dividida fisicamente em zonas. A localização de GD nessas zonas oferece maiores possibilidades ao atributo PF de apresentar melhores valores face a um determinado cenário de avarias gerado. Em geral, as soluções com melhores valores do atributo PF estão associadas a uma localização mais uniforme de GD pelas diferentes zonas.

A metodologia desenvolvida é suficientemente abrangente para poder ser aplicada ou adaptada a diferentes contextos (estruturas de mercado) e permitir ao decisor identificar as opções adequadas para a instalação dos equipamentos.
De modo geral, a metodologia desenvolvida mostrou-se eficaz na obtenção de soluções com resultados satisfatórios para as funções objectivo consideradas de minimização de perdas e minimização de custos. As soluções calculadas permitem ainda obter melhoria dos níveis de tensão nos vários nós da rede e uma perspectiva de segurança no abastecimento dada a possibilidade de operar de forma isolada, em "ilhas", perante eventuais avarias ou falhas no abastecimento, após a instalação dos equipamentos.
Analisando os resultados pertinentes a cada tipo de localização, pode-se concluir que a instalação de GD, apesar de inicialmente mais onerosa, tende a ser compensada devido ao grande impacto nas diminuições das perdas técnicas e às garantias de abastecimento de energia aos consumidores locais no caso de falha na alimentação central ou em caso de avaria local.

7.1 Principais contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Concepção e desenvolvimento de uma abordagem multi-objectivo para localização e dimensionamento de unidades GD de pequena potência, BCs e DRA em redes de distribuição;
- O cálculo de um atributo adicional PF para cada solução, permitindo ao AD uma escolha mais informada quando confrontado com um conjunto de soluções não dominadas (perdas e custos);

- A criação de zonas confinadas por DRA, que podem operar de forma isolada, permitindo melhorar a continuidade de serviço no caso de eventuais avarias na rede em causa ou a montante desta;
- Adaptação de um algoritmo de cálculo do trânsito de potência para incluir a influência das fontes de GD e as BCs;
- Avaliação do impacto da GD sobre o sistema de distribuição (melhoria dos níveis de tensão nos nós da rede);
- Nesta implementação é incluído o conceito de grau de robustez das soluções geradas; apesar de serem utilizados parâmetros fixos, permite classificar as soluções de acordo com os seus graus de robustez.

Apesar da diversidade das estruturas do mercado de energia eléctrica foi construído um modelo que pode ser utilizado por uma entidade responsável pela regulamentação e planeamento em termos de localização e dimensionamento de unidades GD em redes de distribuição, que se julga aplicável quer a estruturas de distribuição verticalmente integradas, quer a estruturas em que se verifica o desmembramento de todas as funções existentes (geração, transporte, distribuição e comercialização).

7.2. Desenvolvimentos futuros

O tema da localização de GD e BCs em redes de energia apresenta-se como um assunto actual não só pelo interesse das empresas de distribuição em reduzir perdas como também pelos critérios de qualidade de serviço (fundamentalmente a continuidade de serviço) a que estas estão obrigadas, minimizando o impacto ambiental e a dependência em relação aos combustíveis fósseis causado pela produção de electricidade. Além destas questões é ainda de salientar a importância das unidades GD na minimização de problemas sociais e económicos associados a avarias locais ou ao nível da GC causando *Black-outs*. Como se observou pelo estudo dos casos apresentados, sem expansão da rede e apenas com a instalação de alguns tipos de GD e BCs, consegue-se não só uma redução substancial das perdas, como também uma melhoria acentuada do perfil de tensões da rede.

Como direcções de trabalho futuro podem identificar-se as seguintes:

- Na melhoria da ferramenta computacional desenvolvida;

- Considerar os limites térmicos das linhas nas restrições do modelo;
- Considerar as tomadas de regulação em carga dos transformadores;
- Considerar redes com qualquer tipo de topologia;
- Tornar a aplicação interactiva;
- Considerar qualquer instante do diagrama de cargas.

- Simulação do AG com alguns parâmetros variáveis no tempo (durante a simulação), por exemplo, a população com tamanho variável. Também a variação de outros parâmetros, em função dos resultados que vão sendo obtidos em cada geração, pode ser alvo de desenvolvimentos futuros, por exemplo com a articulação explícita de preferências do AD, quer de uma forma interactiva, quer de uma forma automática;

- Continuação do esforço de obtenção de funções de avaliação que possam ser incorporadas nos processos de avaliação do desempenho dos algoritmos e eventualmente na função de atribuição da medida de desempenho a cada indivíduo da população em cada geração;

- Desenvolvimento de uma metodologia que permita obter a melhor operação das unidades GD ao longo de um período de interesse;

- Estudo de sistemas de protecção visando garantir a integridade do sistema quando da injecção de energia pelas unidades de GD de qualquer potência na rede de distribuição;

- Análise do efeito provocado pela GD sobre os custos associados às características operacionais das redes de distribuição, tais como perdas de energia e potência, queda de tensão, energia fornecida fora dos padrões, etc.;

- Análise e estudo de sistemas integrados de comunicação para operação conjunta de diversas fontes alternativas de energia, tais como eólica, biomassa, gás natural, solar e células de combustível, permitindo às unidades GD funcionarem de forma agrupada como VPP, Centralizada ou Descentralizada, no paradigma das Redes Inteligentes.

BIBLIOGRAFIA

Anantasate, S., Chokpanyasuwan, C., Pattaraprakor, W. e Bhasaputra, P. (2008), *"Multi-objectives Optimal Placement of Distributed Generation Using Bee Colony Optimization"*, GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS, 2008.

Andre, J., Siarry, P. e Dognon, T. (2001), *"An improvement of the standard genetic algorithm fighting premature convergence in continuous optimization"*, Advances in Engineering Software, 32, p. 49-60, 2001.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Eléctrica, *"Distribution procedures – PRODIST"*, http://www.aneel.gov.br/383.htm (consultado em Junho de 2006).

Ang, B.W. e Huang, J.P. (1999), *"Break-even price of distributed generation under uncertainty"*, in Energy 24, p. 579-589 Elsevier Science, 1999.

Angelopaulos, K. (2004), "*Integration of Distributed Generation in Low Voltage Networks: Power Quality and Economics*", Tese mestrado, Glasgow 2004.

Antunes, C. H. (1991), *"Apoio à Decisão em Programação Linear Multi-objectivo"*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 1991.

Bäck, T. (1996), "*Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms*", New York: Oxford University Press, 1996.

Barrico, C. e Antunes, C.H. (2006), *"Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization"*, Research Report N3/2006, INESC Coimbra, Portugal, 2006.

Barrico, C. e Antunes, C.H. (2006 a), *"Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization Using a Degree of Robustness Concept"*, Proceedings of the 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2006): p. 6778-6783, 2006.

Barrico, C. e Antunes, C.H. (2007), *"An Evolutionary Approach for Assessing the Degree of Robustness of Solutions to Multi-objective Models"*, Studies in Computational Intelligence (SCI) 51, p. 565-582, Springer, 2007.

Bayegan, M. (2001), *"A Vision of the Future Grid"*, IEEE Power Engineering Review, 2001.

Borges, C.L.T., Falcão e D. M. (2006), *"Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvment"*, Electric Power and Energy Systems 28, p. 413-420, 2006.

Branke, J. (1998), *"Creating Robust Solutions by means of an Evolutionary Algorithm"*, Parallel Problem Solving from Nature, Lecture Notes in Computer Science 1498, Springer: p. 119-128, 1998.

Branke, J. (2000), *"Efficient Evolutionary Algorithms for Searching Robust Solutions"*, Adaptive Computing in Design and Manufacture (ACDM 2000), Springer: p. 275-286, 2000.

Branke, J., Kaubler, T. e Schmeck, H. (2001), *"Guidance in Evolutionary Multi-Objective Optimization"*, Advances in Engineering Software, 32, 2001.

Broadwater, R. P., Chandrasekaram, A., Huddleston, C. T., Khan, A. H. (1988), *"Power Flow Analysis of Unabalanced Multiphase Radial Distribution Systems"*, Electric Power System Research, Vol. 14, 1988.

Carpinelli, G., Celli, G., Pilo, F. e Russo, A. (2001), *"Distributed Generation Sitting and Sizing under Uncertainty"*, Paper accepted for presentation at PPT 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 2001.

Carpinelli, G., Celli, G., Pilo, F. e Russo, A. (2002), *"Embedded Generation Planning under Uncertainty Including Power Quality Issues"*, 7th Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS 2002) Conference, Napoli (Italia), 22-26 September 2002, p. 525-533, 2002.

CBO (2003), *"Prospects for Distributed Electricity Generation"*, A CBO – Congress of the United States, Congressional Budget Office paper, 2003.

CEC (2006), *"Distributed energy resource"*, California Energy Commission. http://www.energy.ca.gov/distgen/index.html (consultado em Agosto de 2006).

Celli, G. e Pilo, F. (2001), *"Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks"*, Power Industry Computer Applications, 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference, p.81-86, 2001.

Celli, G., Ghiani, E., Mocci, S. e Pilo ,F. (2003), *"A Multi-objective Formulation for the Optimal Sizing and Sitting of Embedded Generation in Distribution Networks"*, Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy, 2003.

Celli, G., Ghiani, E., Mocci, S. e Pilo ,F. (2005), *"A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation"*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 20, issue 2, p. 750-757, 2005.

Chen, S.Y. e Rajan, S.D. (1998), "*Improving the efficiency of genetic algorithms for framedesigns"*, Engineering Optimization, Vol. 30, No. 3/4, p. 281-307, 1998.

Chen, S.Y. e Rajan, S.D. (2000), *"A robust genetic algorithm for structural optimization"*, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 10, No. 4, p. 313-336, 2000.

Chen, T. H., Chen, M. S., Hwang, K. J., Koats, P. e Chebli E. A., (1991), *"Distribution system Power Flow Analysis- A Rigid Approach"*, IEEE Transaction on Power Delivery, 10(2), p. 987-994, 1991.

Chuang, A. S. e Wu, Félix (2001), *"A Game-Theoretic Model for Generation Expansion Planning: Problem Formulation and Numerical Comparisons"*, in IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16 Nº4, 2001.

CIRED Working Group WG 4 (1999), "*Dispersed generation - preliminary report*," 1999.

Clímaco, J., Antunes, C. H. e Alves, M. J. (2003), "*Programação Linear Multi-objectivo – Do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objectivo",* Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.

Coello, C., Veldhuizen, D. e Lamont G. (2002), "*Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems"*, Kluwer Academic Press, 2002.

COM (1997) - European Commission 599, "*Communication from the Commission Energy for the future: Renewable sources of energy - White Paper for a Community strategy and action plan"*, 1997.

Costa, L. (2003), "*Algoritmos Evolucionários em Optimização Uni e Multi-objectivo"*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2003.

Crossley, W.A., Cook, A.M. e Fanjoy, D.W. (1999), *"Using the two-branch tournament genetic algorithm for multiobjective design"*, AIAA, Vol.37, No. 2, 1999.

Cvetkovic, D. e Parmee, I. (1999a), "*Use of Preferences for GA-based Multi-objective Optimisation"*, Proceedings of the GECCO 99 - Genetic and Evolutionary Computation Conference, Banzahf and Daida (Eds), San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, p. 1504-1509, 1999.

Cvetkovic, D. e Parmee, I. (1999b), *"Genetic Algorithm-based Multi-objective Optimisation and Conceptual Engineering Design"*, CEC 99 - Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Press, p. 29-36, 1999.

Daily, P. A. e Morrison, J. (2001), *"Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems*", in Proc. 2001 Rural Electric Power Conference, p. A2-1-A2-13, 2001.

Das, D., Nagi, H. S. e Kothari, D. P., (1994), *"Novel Method for Solving Radial Distribution Networks"*, IEEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, 141(4), p. 291-298, 1994.

Deb, K. e Goldberg, D. E., (1989), "*An investigation of Niche and Species Formation in Genetic Function Optimization*", In : Proc. Of International Conference on Genetic Algorithms, p. 42-50, 1989.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. e Meyarivan ,T., (2000), *"A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II"*, Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-VI), Schoenauer et al. (Eds), p. 849-858, Springer, Berlin 2000.

Deb, K. (2001), "*Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*", John Wiley & Sons, England, 2001.

Deb, K. e Gupta, H. (2004), *"Introducing robustness in multiple-objective optimization"*, KanGAL Report Number 2004016, Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, Indian Institute of Technology Kanpur, 2004. http://www.iitk.ac.in/kangal/papers/k2004016.pdf (consultado em Setembro de 2006).

Deb, K. e Gupta, H. (2005), *"Searching for robust pareto-optimal solutions in multiobjective optimization"*, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, 2005, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science 3410. C.A.C. Coello, A.H. Aguirre e E. Zitzler (Eds.) Springer, p. 150-164, 2005.

Domínguez, J. A., Yusta, J. M., Bayod, A. A., Bernal, J. L., Velilla, M. J., Mur, J., García, M. A. e Diaz, A. (2006), "*Optimal Location of small generators in weak networks with optimal operation",* ICREPQ'06, http://www.icrepq.com/full-paper-icrep/268_dominguez.pdf (consultado em Julho de 2009).

Dowsland, K. (1996), *"Genetic Algorithms - a Tool for OR?"*, Journal of the Operational Research Society, 47, p. 550-561, 1996.

EC - European Commission (2001), "*Directive 2001/77/EC on the promotion of the electricity produced from renewable energy source in the internal electricity market*", 2001.

EC - European Commission (2008), *"Eurostat - Statistical Office of the European Communities"*.http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=0&language=en&pcode=tsien050 (consultado em Outubro de 2008).

Eiben, Á., Hinterding, R. e Michalewicz, Z. (1999), *"Parameter Control in Evolutionary Algorithms"*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3 (2), p. 124-141, 1999.

EPRI (2006), *"About distributed resources"*. http://www.epri.com/targetDesc.asp?program=262184&value=03T101.0&objid=287595 (consultado em Agosto de 2006).

ERSE (2009), *"Informação sobre Produção em Regime Especial"*, Lisboa 2009. (consultado em Fevereiro de 2009).

ERSE (2009a). http://www.erse.pt/pt/eea/planodepromocaodaeficiencianoconsumoppec/edicoesPPEC/ppec20092010/Documents/Breves%20notas%20PPEC%202009-2010.pdf (consultado em Fevereiro de 2006).

Falaghi, H. e Haghifam, M.R. (2007), "*ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems"*, Power Tech 2007, IEEE Lausanne, p. 555 – 560, 2007.

Fonseca, C.M. e Fleming, P.J. (1993), "*Genetic Algorithms in Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*", In: Proc. of 5th Conference on Genetic Algorithm, p. 416-423, 1993.

Fonseca, C. e Fleming, P. (1998), *"Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms-Part I: A Unified Formulation"*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 28 (1), p. 26-37, 1998.

Gandomkar, M., Vakilian, M. e Ehsan, M. (2005), *"A Combination of Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal DG Allocation in Distribution Networks*", CCECE/CCGEI, Saskatoon, 2005.

Gandomkar, M., Vakilian, M., Ehsan, M. (2005a), "*A Genetic-Based Tabu Search Algorithm for Optimal DG Allocation in Distribution Networks",* Electric Power Components and Systems 33, p. 1351-1362, 2005.

Gandomkar, M., Shooshtary, P., Sasani, H. R., Rezaei, N. (2006), "*Application of Simulated Annealing to Distribution Network Expansion Planning with Distributed Generation"*, AUPEC'06 Melborne, 2006. http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec06/htdocs/content/pdf/116.pdf (consultado em Julho de 2006).

Glover, Fred e Kluwer, Manuel L. (1997), "*Tabu Search"*, Springer, ISBN 079239965X, 9780792399650, 1997.

Glover, Fred, Kochenberger, Gary A. (2003), "*Handbook of metaheuristics"*, Springer, ISBN1402072635, 9781402072635, 2003.

Goldberg, D. e Richardson, J.(1987), "*Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization"*, Proceedings of the second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Cambridge, Massachusetts, p. 41 – 49, ISBN:0-8058-0158-8, 1987.

Goldberg, D. (1989), "*Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning",* Addison-Wesley, Reading, MA., 1989.

Goldberg, D. E. (1998), "*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*", Massachusets: Addison-Wesley Co, 1989.

Gomes, A. F. P. (2004), "*Identificação e apoio à selecção de estratégias de controlo directo de cargas - Uma abordagem multi-objectivo evolucionária*", Tese Doutoramento. Fac. Ciências e Tecnologia, Univ. Coimbra, 2004.

Gov. (2008), www.portugal.gov.pt/pt/Documentos/Governo/MEI/**PNAEE**.pdf (consultado em Outubro de 2008).

Haensen, E., Espinoza, M., Pluymers B., Goethals, I., Thong, V., Driesen, J., Belmans, R. e Moor, B. (2005), *"Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Units Using Genetic Optimization Algorithms"*, Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XI, No. I, 2005.

Harrison, Gareth, P. e Piccolo, A. (2007), *"Distributed Generation Capacity Evaluation Using Combined Genetic Algorithm and OPF*", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 8, Issue 2, Article 7, 2007.

Harrison, Gareth, P. e Wallace, A. R. (2005), "*OPF evaluation of distribution network capacity for the connection of distributed generation*", *IEE Proc. Generation, Transmission & Distribution* 152 (1), p. 115-122, 2005.

Hifi, M. (1997), *"A genetic algorithm-based heuristic for solving the weighted maximum independent set and some equivalent problems"*, Journal of Operational Research Society 48, p. 612-623, 1997.

Horn, J., Nafploitis, N. e Goldberg, D. (1994), "*A niched pareto genetic algorithm for multi-objective optimization*", Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation (CEC'94), IEEE Press, p. 82–87, 1994.

Hughes, E.J. (2001), *"Evolutionary Multi-Objective Ranking with Uncertainty and Noise"*. Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO-2001): p. 329-343, 2001.

Ishibuchi, H. e Murata, T. (1998), "*A Multi-Objective Genetic Local Search Algorithm and Its Application to Flowshop Scheduling*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C, 28 (3), p. 392-403, 1998.

Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D., e Strbac, G. (2000), "*Embedded generation"*, London: Institution of Electrical Engineers, 2000.

Jiménez, M. S. (2006), "*Smart Electricity Networks based on large integration of Renewable Sources and Distributed Generation*", Kassel University press, 2006.

Jin, Y. e Sendhoff, B. (2003), "*Trade-Off between Performance and Robustness: An Evolutionary Multiobjective Approach"*, Proceedings of the Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO-2003): p. 237-251, 2003.

Kallassy, A. e Marcelin, J.L. (1997), "*Optimization of stiffened plates by genetic search"*, Structural Optimization, 13, p. 134-141, 1997.

Kim, J., Park, S., Park, K. e Singh, C. (1998), *"Dispersed Generation Planning using Improved Hereford Ranch Algorithm"*, proceedings IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Conference, p. 678 – 683, 1998.

Kim, K. et al. (2002), "*Dispersed Generator Placement Using Fuzzy- GA in Distribution Systems"*, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, v. 3, 21-25 jul. 2002, p.1148- 1153, 2002.

Knowles, J. e Corne, D. (2000), "*Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy*", Evolutionary Computation Journal, 8, 2, p. 149-172, 2000.

Kouvelis, P., e Yu, G. (1997), "*Robust discrete optimization and its applications*", Kluwer Academic Publishers, 1997.

Kruesuk, W. e Ongsakul, W. (2006), *"Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization"*, Proceedings of the Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2006), Melbourne, Victoria, Australia, 2006.

Leão, M. T. P. e Matos, M. A. (1997), "*Distribution Planning with Fuzzy Loads and Independent Generation"*, CIRED, Conference Publication No. 438, p. 6.12.2-6.12.5, 1997.

Leão, M. T. e Matos, M.A. (1999), "*Fuzzy Modelling of Independent Producers for Multicriteria Electric Distribution Planning*", International Transactions in Operational Research, 1999.

Li, M., Azarm ,S. e Aute, V. (2005), *"A Multi-Objective Genetic Algorithm for Robust Design Optimization"*, Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'05): p. 771-778, 2005.

Lin, C. Y., Liou, J. Y. e Yang, Y. J. (1998), "*Hybrid multimodal optimization with clustering genetic strategies"*, Eng. Opt., Vol. 30, p. 263-280, 1998.

Lim, D., Ong, Y.S. e Lee, B.S. (2005), *"Inverse Multi-Objective Robust Evolutionary Design Optimization in the Presence of Uncertainty"*, Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'05): p. 55-62, 2005.

Mathfound, S. W. "*Niching Methods*". In : Bãck, T. ; Fogel, D.B. (2000). Michalewicz (Eds.), Evolutionary Computation 2, p. 87-92, Institute of physics Publishing, 2000.

Michalewicz, Z. e Fogel, D.B. (2000), "*How to solve it: modern heuristics".* Springer-Verlag New York, Inc., 2000.

Navarro, J. D., Rújula, A. B. (2007), "*Application Tabu Search in Matlab for Optimize Distribution Systems",* ICREPQ'07" http://www.icrepq.com/icrepq07/249-dominguez.pdf (consultado em Julho de 2008).

Patterson, W. (1999), *"Transforming Electricity – The Coming Generation of Change"*, The Royal Institute of international Affairs, Earthscan Publications Ltd, London, 1999.

Pires, D. H. (2001), *"Modelo Multiobjectivo para Apoio à Localização de Condensadores em Redes Radiais de Distribuição"*, Dissertação de Mestrado (Tese/042), Coimbra 2001.

Pisca, I. e Eremia, M. (2009), *"Optimal Distributed Generation and Sizing using Genetic Algorithm"*, 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Brazil, ISBN 978-1-4244-5097-8, 2009.

RQS (2006), *"Regulamento de Qualidade de Serviço"*, Site oficial EDP http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Clients/Regulations/Service_quality.htm, documento RQS_2006[1].pdf (consultado em Junho de 2008).

Rudolph, G. (2001), *"Evolutionary Search under Partially Ordered Fitness Sets"*, Proceedings of the International NAISO Congress on Information Science Innovations (ISI 2001), p. 818-822, ICSC Academic Press: Millet/Sliedrecht, 2001.

Santos, V. E., Martins, A. G., e Antunes, C. H. (2006), *"A Multi-Objective Model for Sizing and Placement of Distributed Generation"*, WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 7, Volume 1, ISSN 1790-5060, 2006.

Santos, F. A. e Santos, F.M. (2008), "*Geração Distribuída versus Centralizada*". http://www.ipv.pt/millenium/Millenium35/11.pdf (consultado em Janeiro de 2009)

Schaffer, J. (1985), "*Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*", in Genetic Algorithms and their Applications: Proc. of First International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum, p. 93-100, 1985.

Sedighizadeh, M. e Rezazadeh, A. (2008), *"Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile"*, World Academy of Science, Enginearing and Technology, Issue 37, 2008.

Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A. e Luo, G. X. (1988), "*A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks"*, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, p. 753-762, 1988.

Schneider, J. J., Kirkpatrick, Scott (2006), "*Stochastic Optimization"*, Springer, ISBN 3540345590, 9783540345596, 2006.

Singh, R. e Goswami, S. (2009), *"A Genetic Algorithm Based Approach for Optimal Allocation of Distributed Generations in Power Systems for Voltage Sensitive Loads"*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 4, No. 2, ISSN 1819-6608, 2009.

Srinivas, M. S. (2000), "*Distribution Load Flows: A Brief Review*", Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting, Singapore, 2000.

Srinivas, N. e Deb, K. (1994), "*Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms*", Evolutionary Computation, vol. 2, no. 3, p. 221-248, 1994.

Steuer, R. (1986), "*Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application"*, John Wiley & Sons, 1986.

Thorp, N.A. e Pierson, B.L. (1998), "*Cluster analysis after a partial genetic algorithm search"*, Eng. Opt., Vol. 31, p. 225-246, 1998.

Teich, J. (2001), "*Pareto-Front Exploration with Uncertain Objectives*", Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO-2001): p. 314-328, 2001.

UNFCCC (2006), United Nations Framework Convention on Climate Change Kyoto protocol - 1997. http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php (consultado em Agosto de 2006)

USDE (2006), U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, DER basics. http://www.eere.energy.gov/femp/technologies/derchp_derbasics.cfm (consultado em Agosto de 2006)

Valenzuela, M. e Uresti, E. (1997), "*A Non-Generational Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization*", Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms, T. Back (Ed), San Francisco, CA: Morgan Kauffman, p. 658-665, 1997.

Veldhuizen, D. A. V. (1999), "*Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analysis and New Innovations*", PhD thesis, Depart. of Electrical and Computer Engineering. Graduated School of Engineering. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999.

WADE (2008), World survey of decentralized energy (2006). http://www.localpower.org/documents_pub/report_worldsurvey06.pdf (consultado em Agosto de 2008)

Willis, H. L. e Scott, W. G. (2000*),"Distributed Power Generation – Planning and Evaluation"*, Marcel Dekker, inc., New York – Basel, 2000.

Yang, J. e Soh, C.K. (1997), "*Structural optimisation by genetic algorithms with tournament selection"*, J. Computing Civil Engineering, 1997.

Zitzler, E. e Thiele, L. (1998), "*An Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization: The Strength Pareto Approach*", Technical Report 43, Computer Engineering and Communications Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 1998.

Zitzler, E., Deb, K. e Thiele, L. (2000), "*Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results*", Evolutionary Computation 8(2), p. 173-195. 2000.

ANEXO A: MÉTODO DE ANÁLISE DO TRÂNSITO DE POTÊNCIA

O presente Anexo tem como objectivo a descrição do método iterativo implementado para cálculo do trânsito de potência em redes radiais, que se baseia em Das et al. (1994) e implementado em Pires et al. (2001).

A metodologia de resolução utilizada para a análise do trânsito de potência recorre a um sistema particular de identificação da rede, i.e. numeração de nós, troços e alimentadores. Uma vantagem desta técnica é a de que todos os dados são armazenados sobre a forma vectorial, o que reduz consideravelmente os requisitos de memória computacional. Por outro lado, o número de iterações e tempo de resolução é consideravelmente mais baixo do que quando se utilizam as metodologias convencionais de análise de redes. Para além disso, este método assegura a convergência, o que, nem sempre se consegue com as técnicas tradicionais de análise de redes de transporte (Pires et al., 2001).

A.1 – Notação Utilizada

L índice que indica o lateral.

i índice que indica o nó.

N_L número total de laterais.

N_T número total de troços.

NF_L nó fonte do lateral L.

NS_L nó a seguir ao fonte do lateral L.

UN_L último nó do lateral L.

F_i variável que indica número de ramos ligados ao nó i.

$P_{total\ i}$ potência activa total alimentada a partir do nó i.

$Q_{total\ i}$ potência reactiva total alimentada a partir do nó i.

$P_{perdas\ i}$ perda, potência activa, no troço do alimentador que liga o nó i ao $i+1$.

$Q_{perdas\ i}$ perda, potência reactiva, no troço do alimentador que liga o nó i ao $i+1$.

$P_{carga\ i}$ potência activa da carga alimentada a partir do nó *i*.

$Q_{carga\ i}$ potência reactiva da carga alimentada a partir do nó *i*.

$P_{lat\ L}$ potência activa que alimenta a rede a partir do nó a seguir ao nó fonte do lateral *L*, NS_L, com *L* a variar de zero até ao último lateral.

$Q_{lat\ L}$ potência reactiva que alimenta a rede a partir do nó a seguir ao nó fonte do lateral *L*, NS_L, com *L* a variar de zero até ao último lateral.

$P_{soma\ L}$ soma das cargas activas de todos os nós do lateral *L* com excepção do nó fonte, mais a soma das perdas activas de todos os troços do lateral *L* (para $L>0$).

$Q_{soma\ L}$ soma das cargas reactivas de todos os nós do lateral *L* com excepção do nó fonte, mais a soma das perdas reactivas de todos os troços do lateral *L* (para $L>0$).

$P_{auxiliar1\ L}$ soma de todas as cargas activas de todos os nós do lateral *L* que acabaram de ficar para trás, com as perdas activas de todos os troços do lateral *L* que ficaram para trás, com excepção das perdas activas no primeiro troço a seguir ao nó fonte;

$Q_{auxiliar1L}$ soma de todas as cargas reactivas de todos os nós do lateral *L* que acabaram de ficar para trás, com as perdas reactivas de todos os troços do lateral *L* que ficaram para trás, com excepção das perdas reactivas no primeiro troço a seguir ao nó fonte;

$P_{auxiliar2\ L}$ soma de todas as cargas activas de todos os nós, excepto os nós fonte, de todos os laterais que acabaram de ficar para trás, com as perdas activas de todos os troços dos laterais que ficaram para trás.

$Q_{auxiliar2\ L}$ soma de todas as cargas reactivas de todos os nós, excepto os nós fonte, de todos os laterais que acabaram de ficar para trás, com as perdas reactivas de todos os troços dos laterais que ficaram para trás.

P_i Potência activa alimentada a partir do nó *i*.

Q_i Potência reactiva alimentada a partir do nó *i*.

V_i Tensão no nó *i*.

A.2 – O Método de cálculo

Considera-se uma rede de distribuição com apenas um alimentador principal.
Através da equação recursiva da amplitude da tensão, equação (A.1), pode calcular-se a tensão de um nó, por exemplo V_{i+1} desde que se conheça o valor da tensão do nó anterior, V_i. Uma vez que se conhece a amplitude da tensão na subestação, $|V_0|$ =1 p.u., podem calcular-se todas as tensões nos restantes nós da rede.

$$V_{(i+1)}^{l^2} = V_i^{\ 2} - 2.\left(r_i\ .P_i\ + X_i\ .Q_i\ \right) + \left(r_i\ + X_i\ \right).\left(\frac{P_i^{\ 2} + Q_i^{\ 2}}{V_i^{\ 2}}\right) \tag{A.1}$$

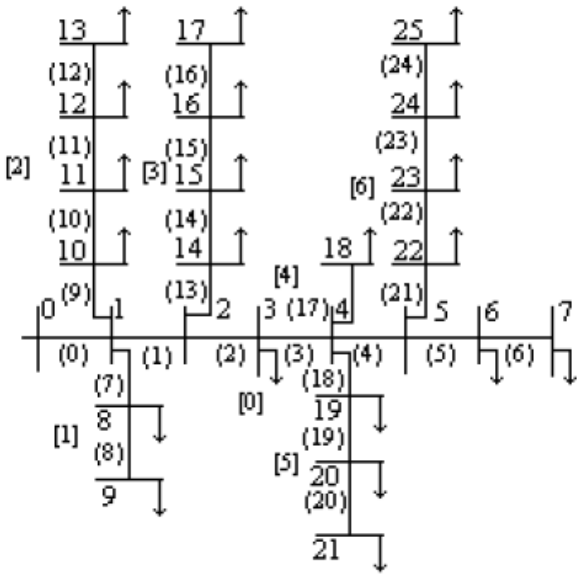

Figura A.1 – Rede radial com identificação dos nós, troços e alimentadores.

Segundo a figura A.1 pode ainda dizer-se que a potência activa total alimentada a partir do nó 1 é a soma de todas as cargas alimentadas a partir dele próprio com as dos nós a seguir e com as perdas apresentadas por todos os troços, com excepção do troço (0), como se pode ver na equação (A.2).

$$P_{total1} = \sum_{i=1}^{N} P_{carga_i} + \sum_{j=1}^{N-1} P_{perdas_j} \tag{A.2}$$

De forma semelhante temos a expressão da potência reactiva alimentada a partir do nó 1, equação (A.3).

$$Q_{total1} = \sum_{i=1}^{N} Q_{carga_i} + \sum_{j=1}^{N-1} Q_{perdas_j} \tag{A.3}$$

As perdas activas são dadas pela equação (A.4),

$$P_{perdas_1} = r_1 \frac{{P_{total_1}}^2 + {Q_{total_1}}^2}{V_1^2} \tag{A.4}$$

e as perdas reactivas pela equação (A.5).

$$Q_{perdas_1} = x_1 \frac{{P_{total_1}}^2 + {Q_{total_1}}^2}{V_1^2} \tag{A.5}$$

Como o processo é iterativo, o valor das perdas activas e reactivas utilizadas para o cálculo numa dada iteração, são dadas pelo valor que estas grandezas tiveram na iteração anterior (na primeira iteração considera-se que as perdas nos troços são nulas).

As equações anteriores, (A.2) a (A.5), podem ser escritas para qualquer nó ou troço genéricos da rede, como se vê nas equações (A.6) a (A.9):

$$P_{totali+1} = \sum_{h=i+1}^{N} P_{carga_h} + \sum_{j=i+1}^{N-1} P_{perdas_j} \tag{A.6}$$

$$Q_{totali+1} = \sum_{h=i+1}^{N} Q_{carga_h} + \sum_{j=i+1}^{N-1} Q_{perdas_j} \tag{A.7}$$

$$P_{perdas_{i+1}} = r_{i+1} \frac{{P_{total_{i+1}}}^2 + {Q_{total_{i+1}}}^2}{V_{i+1}^2} \tag{A.8}$$

$$Q_{perdas_{i+1}} = x_{i+1} \frac{{P_{total_{i+1}}}^2 + {Q_{total_{i+1}}}^2}{V_{i+1}^2} \tag{A.9}$$

Para o último nó, sabe-se que I_N=0, logo têm-se as equações:

$$P_{total_N} = P_{carga_N}$$

(A.10)

$$Q_{total_N} = Q_{carga_N}$$

(A.11)

No processo iterativo de cálculo, considera-se inicialmente que as perdas nos troços são nulas. Esta aproximação inicial permite fazer uma estimativa do valor da amplitude das tensões em todos os nós. Em iterações seguintes o valor das perdas vai sendo recalculado à custa da estimativa da amplitude das tensões na iteração anterior. As iterações prosseguem até se atingir o critério de convergência escolhido. Neste caso, o critério de convergência adoptado é que a diferença entre as perdas, activas e reactivas, em iterações sucessivas, em cada troço seja inferior a ε, com ε=1 Watt ou 1 VAr, respectivamente. Quando se atinge esta condição verifica-se que as aproximações para as grandezas calculadas coincidem com os valores obtidos por metodologias convencionais de análise de redes.

Para mais detalhes sobre o método de trânsito de potência adoptado, consultar Pires et al. (2001).

ANEXO B: TOPOLOGIA DAS REDES EM ESTUDO

Neste anexo apresentam-se as topologias das redes de distribuição utilizadas nos casos de estudo. Uma rede de distribuição de 94 nós retirada de Pires et al. (2001) e uma rede de distribuição de 86 nós.

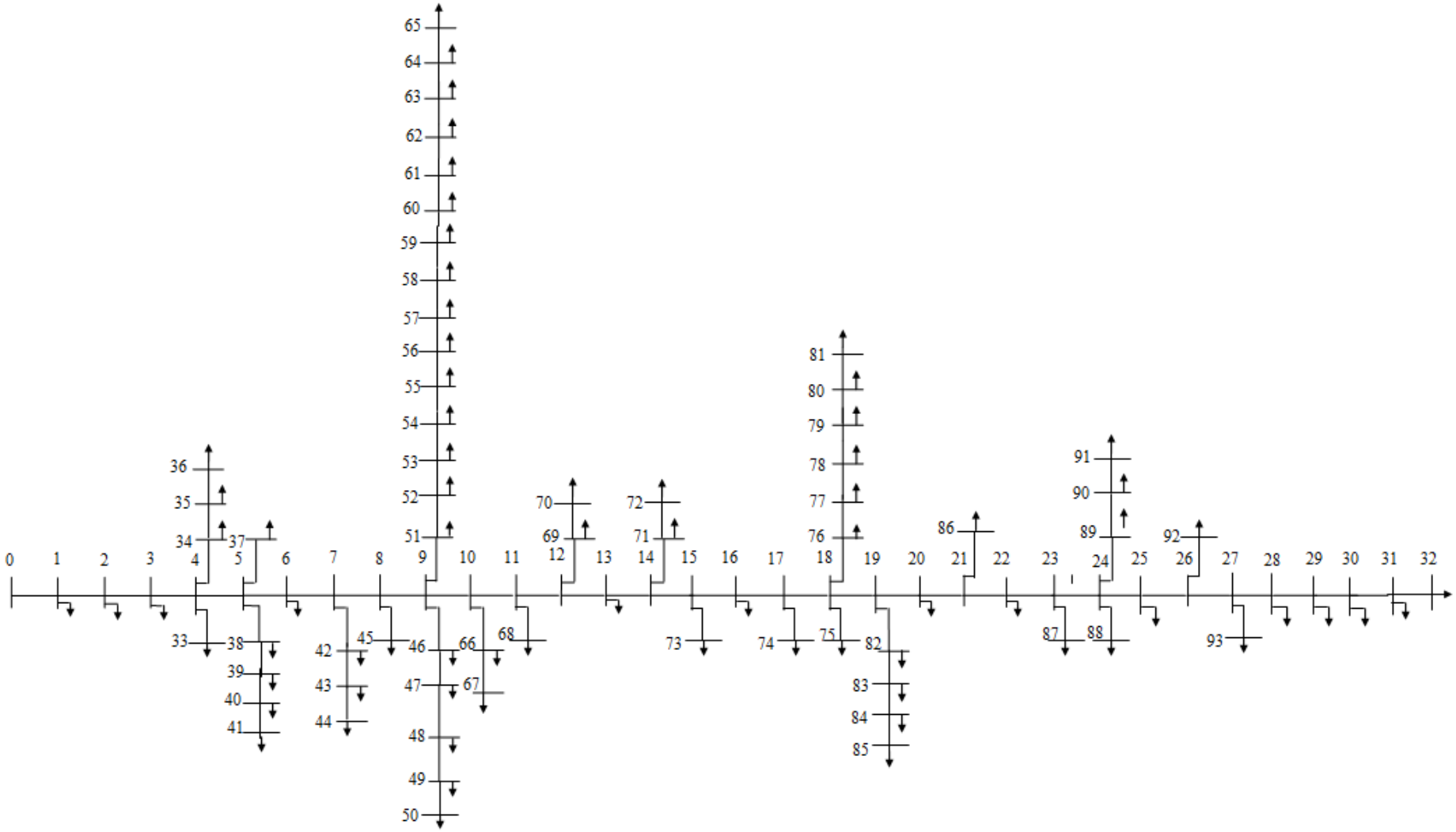

Figura B.1 – Topologia da rede de distribuição de 94 nós, retirada de Pires et al. (2001).

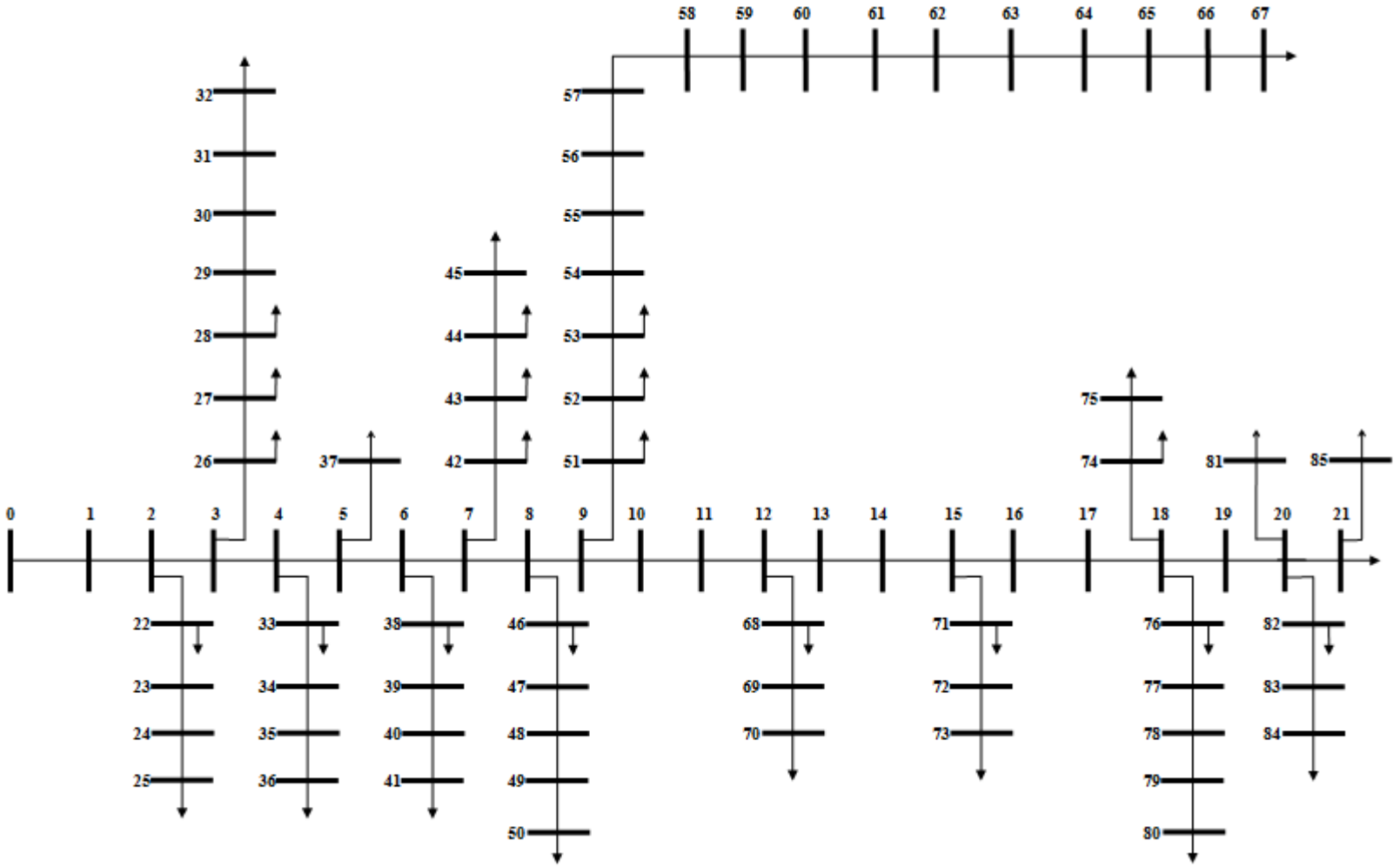

Figura B.2 – Topologia da rede de distribuição de 86 nós.

ANEXO C: DADOS DAS REDES EM ESTUDO

Neste anexo apresentam-se os dados das redes eléctricas que serviram de base aos casos de estudo.

Apresentam-se inicialmente as tabelas dos dados das redes, dos tipos de GD e BCs.

Caracterização da rede de distribuição de 94 nós

Tensão no nó 0 (SE): 15,75 kV

Nó	P(kW)	Q(kVAr)		Nó	P(kW)	Q(kVAr)
0	0	0		47	36,9	17,9
1	22,5	10,9		48	63,9	31
2	240,3	116,4		49	68,4	33,1
3	24,3	11,8		50	27,9	13,5
4	0	0		51	81	39,2
5	0	0		52	69,3	33,6
6	28,8	14		53	62,1	30,1
7	0	0		54	35,1	17
8	0	0		55	205,2	99,4
9	0	0		56	31,5	15,3
10	0	0		57	521,1	252,4
11	0	0		58	212,4	102,9
12	0	0		59	39,6	19,2
13	57,6	27,9		60	45	21,8
14	0	0		61	17,1	8,3
15	0	0		62	21,6	10,5
16	18,9	9,2		63	35,1	17
17	0	0		64	70,2	34
18	0	0		65	34,2	16,6
19	55,8	27		66	22,5	10,9
20	40,5	19,6		67	45,9	22,2
21	0	0		68	33,3	16,1
22	54	26,2		69	36,9	17,9
23	0	0		70	45	21,8
24	0	0		71	75,6	36,6
25	46,8	22,7		72	67,5	32,7
26	0	0		73	27,9	13,5

Nó	P(kW)	Q(kVAr)		Nó	P(kW)	Q(kVAr)
27	0	0		74	38,7	18,7
28	13,5	6,5		75	53,1	25,7
29	3,6	1,7		76	65,7	31,8
30	18	8,7		77	63	30,5
31	21,6	10,5		78	67,5	32,7
32	9	4,4		79	45	21,8
33	64,8	31,4		80	9	4,4
34	65,7	31,8		81	16,2	7,8
35	59,4	28,8		82	67,5	32,7
36	13,5	6,5		83	296,1	143,4
37	161,1	78		84	72	34,9
38	26,1	12,6		85	76,5	37,1
39	134,1	65		86	90,9	44
40	85,5	41,4		87	72	34,9
41	41,4	20,1		88	63	30,5
42	41,4	20,1		89	21,6	10,5
43	41,4	20,1		90	36,9	17,9
44	21,6	10,5		91	20,7	10
45	25,2	12,2		92	17,1	8,3
46	45,9	22,2		93	90	43,6

Tabela C.1 – Potências activas e reactivas nos 94 nós da rede.

Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)		Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)
0	0	1	0,112	0,1873		47	47	48	0,7688	0,4294
1	1	2	0,0763	0,1274		48	48	49	0,2599	0,1451
2	2	3	0,1891	0,3161		49	49	50	0,8654	0,4833
3	3	4	0,2243	0,3749		50	9	51	0,5248	0,5179
4	4	5	0,2571	0,4297		51	51	52	0,1737	0,1714
5	5	6	0,134	0,2239		52	52	53	0,6148	0,6068
6	6	7	0,2986	0,4991		53	53	54	0,198	0,1954
7	7	8	0,1953	0,3265		54	54	55	0,198	0,1954
8	8	9	0,5097	0,8519		55	55	56	0,285	0,2813
9	9	10	1,5303	1,5101		56	56	57	0,1429	0,141
10	10	11	0,1889	0,1864		57	57	58	0,3409	0,1904
11	11	12	0,1816	0,1793		58	58	59	0,3679	0,2055
12	12	13	0,0661	0,0653		59	59	60	0,3591	0,2006
13	13	14	0,4115	0,4061		60	60	61	0,3503	0,1957
14	14	15	0,2584	0,255		61	61	62	0,4219	0,2356
15	15	16	0,2033	0,2006		62	62	63	1,538	0,5517
16	16	17	0,7243	0,7148		63	63	64	0,9788	0,3511
17	17	18	0,2162	0,2134		64	64	65	1,4911	0,5349

Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)		Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)
18	18	19	0,35	0,3454		65	10	66	0,969	0,2552
19	19	20	1,4775	0,3891		66	66	67	0,6705	0,1766
20	20	21	0,45	0,1185		67	11	68	0,4354	0,2432
21	21	22	0,771	0,203		68	12	69	0,4631	0,2586
22	22	23	0,885	0,2331		69	69	70	0,2707	0,1512
23	23	24	0,9915	0,2611		70	14	71	0,6683	0,3732
24	24	25	0,384	0,1011		71	71	72	0,8525	0,4762
25	25	26	0,7245	0,1908		72	15	73	0,3314	0,1851
26	26	27	1,185	0,3121		73	17	74	0,405	0,2262
27	27	28	1,2353	0,6899		74	18	75	0,4367	0,2439
28	28	29	0,3557	0,1987		75	18	76	0,3416	0,1908
29	29	30	0,9494	0,3406		76	76	77	0,2113	0,118
30	30	31	0,6899	0,3853		77	77	78	1,1249	0,4035
31	31	32	1,5707	0,8773		78	78	79	1,1738	0,6556
32	4	33	1,2655	0,454		79	79	80	0,619	0,3457
33	4	34	0,1688	0,0943		80	80	81	0,5684	0,3174
34	34	35	0,2741	0,1531		81	19	82	0,8393	0,3011
35	35	36	0,2552	0,1425		82	82	83	0,2133	0,1191
36	5	37	0,4165	0,2326		83	83	84	0,3645	0,2036
37	5	38	1,4835	0,3907		84	84	85	0,3206	0,1791
38	38	39	1,8	0,474		85	21	86	0,7675	0,4286
39	39	40	0,5177	0,2892		86	23	87	1,5914	0,5709
40	40	41	0,7148	0,3992		87	24	88	0,702	0,3921
41	7	42	1,0575	0,2785		88	24	89	2,0743	0,7441
42	42	43	0,5198	0,2903		89	89	90	0,678	0,2432
43	43	44	0,3341	0,1866		90	90	91	0,5738	0,3205
44	8	45	0,349	0,1949		91	26	92	0,5913	0,3303
45	9	46	0,5771	0,3223		92	27	93	1,1865	0,3124
46	46	47	0,3598	0,2009						

Tabela C.2 – Características dos ramos da rede de 94 nós

Caracterização da rede de distribuição de 86 nós

Tensão no nó 0 (SE): 15,5 kV

Nó	P(kW)	Q(kVAr)		Nó	P(kW)	Q(kVAr)
0	0	0		43	41,4	10,1
1	32,5	18,9		44	21,6	9,5
2	260,3	916,4		45	25,2	10,2
3	94,3	21,8		46	45,9	20,2
4	200	100		47	36,9	15,9
5	20	1		48	163,9	31,9
6	38,8	24		49	68,4	34,1

Nó	P(kW)	Q(kVAr)		Nó	P(kW)	Q(kVAr)
7	500	200		50	27,9	3,5
8	200	18		51	381	123,2
9	800	300		52	69,3	32,3
10	200	18		53	62,1	39,9
11	400	200		54	35,1	10
12	0	0		55	205,2	9,4
13	77,6	34,4		56	31,5	25,3
14	0	0		57	521,1	252,4
15	0	0		58	212,4	102,9
16	34,9	19,2		59	39,6	19,2
17	0	0		60	245	21,8
18	300	50		61	17,1	8,3
19	56,5	26,5		62	21,6	10,5
20	48,5	29,6		63	35,1	17
21	0	0		64	70,2	34
22	454	26,2		65	34,2	16,6
23	0	0		66	22,5	10,9
24	0	0		67	45,9	22,2
25	146,8	12,7		68	33,3	16,1
26	0	0		69	36,9	17,9
27	0	0		70	45	21,8
28	14,5	9,5		71	75,6	36,6
29	136	2,7		72	67,5	32,7
30	518	206,7		73	27,9	13,5
31	21,6	20,5		74	38,7	18,7
32	9	3,4		75	53,1	25,7
33	64,8	33,4		76	65,7	31,8
34	65,7	41,8		77	63	30,5
35	59,4	68,8		78	67,5	32,7
36	13,5	9,5		79	45	21,8
37	161,1	79		80	9	4,4
38	26,1	13,6		81	16,2	7,8
39	134,1	75		82	67,5	32,7
40	85,5	51,4		83	296,1	143,4
41	41,4	10,1		84	72	34,9
42	41,4	10,1		85	76,5	37,1

Tabela C.3 – Potências activas e reactivas nos 86 nós da rede.

Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)		Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)
0	0	1	0,122	0,1673		43	43	44	0,3561	0,1556
1	1	2	0,0763	0,1274		44	44	45	0,35	0,1889
2	2	3	0,2891	0,3551		45	8	46	0,5888	0,3663
3	3	4	0,2683	0,3869		46	46	47	1,2368	0,1999
4	4	5	0,3279	0,4397		47	47	48	0,7633	0,4678

Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)		Ramo	Nó Origem	Nó destino	R (Ω)	X(Ω)
5	5	6	0,144	0,2239		48	48	49	0,6599	0,2111
6	6	7	0,2086	0,4391		49	49	50	1,7654	0,5
7	7	8	0,2953	0,6265		50	9	51	0,5048	0,6881
8	8	9	0,5997	0,7519		51	51	52	0,1837	0,18
9	9	10	1,5303	1,6101		52	52	53	0,6548	0,6234
10	10	11	0,1989	0,4864		53	53	54	1,2099	0,2009
11	11	12	1,2316	0,1793		54	54	55	0,2098	0,19
12	12	13	0,0761	0,0753		55	55	56	0,295	0,2888
13	13	14	0,5015	0,4761		56	56	57	0,1529	0,15
14	14	15	0,2684	0,256		57	57	58	0,366	0,1945
15	15	16	1,2233	0,2221		58	58	59	0,355	0,21
16	16	17	0,7333	0,7228		59	59	60	0,3588	0,2556
17	17	18	0,2456	0,2134		60	60	61	0,545	0,1999
18	18	19	0,3556	0,2454		61	61	62	0,567	0,2555
19	19	20	1,5	0,4891		62	62	63	1,544	0,5678
20	20	21	0,4599	0,2185		63	63	64	0,567	0,3678
21	2	22	0,7893	0,253		64	64	65	1,5	0,5567
22	22	23	0,8894	0,2375		65	65	66	0,946	0,3009
23	23	24	0,9995	0,2671		66	66	67	0,67	0,189
24	24	25	0,364	0,1671		67	12	68	0,44	0,2567
25	3	26	0,3445	0,1988		68	68	69	0,5111	0,2654
26	26	27	1,115	0,4551		69	69	70	0,2407	0,1789
27	27	28	1,5653	0,6789		70	15	71	0,7683	0,4111
28	28	29	0,3857	0,6667		71	71	72	0,8556	0,397
29	29	30	1,0494	0,4556		72	72	73	0,3345	0,1678
30	30	31	0,7199	0,6663		73	18	74	0,4123	0,2222
31	31	32	1,4507	0,8883		74	74	75	0,4567	0,2567
32	4	33	1,2355	0,545		75	18	76	0,3678	0,2188
33	33	34	0,1488	0,1003		76	76	77	0,345	0,1234
34	34	35	0,3041	0,5661		77	77	78	1,1546	0,4122
35	35	36	0,3052	0,3445		78	78	79	1,1445	0,6455
36	5	37	0,4565	0,2776		79	79	80	0,789	0,4555
37	6	38	1,4475	0,3887		80	20	81	0,5678	0,3432
38	38	39	1,889	0,333		81	20	82	0,9393	0,3
39	39	40	0,5577	0,2229		82	82	83	0,3133	0,1289
40	40	41	0,7748	0,2992		83	83	84	0,3655	0,2123
41	7	42	1,1575	0,2885		84	21	85	0,8406	0,1879
42	42	43	0,5238	0,2993						

Tabela C.4 – Características dos ramos da rede de 86 nós

ANEXO D: RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA ÀS REDES EM ESTUDO

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta desenvolvida às redes 94 e 86 nós.

Apresentam-se inicialmente as tabelas com os resultados dos testes efectuados. De seguida apresentam-se os valores das tensões nos nós para cada uma das soluções caracterizadas e assinaladas nos gráficos que acompanham o texto principal.

Resultados dos testes

Resultados obtidos com a rede de 94 nós

Perdas activas e reactivas nos ramos da rede de 94												
Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 12		Solução 33		Solução 38		Solução 39	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
0	15,287	25,564	5,37	8,98	3,68	6,155	0,267	0,613	2,138	3,575	0,801	1,339
1	10,324	17,239	4,303	7,186	3,038	5,073	0,116	0,194	1,853	3,095	0,769	1,284
2	23,266	38,891	10,656	16,142	7,684	11,173	0,37	0,618	4,937	6,581	1,891	2,493
3	27,318	45,66	13,718	21,256	9,971	14,995	0,208	0,348	6,456	9,12	2,722	3,714
4	28,729	48,016	13,849	21,475	9,846	14,784	0,34	0,735	6,151	8,609	1,973	3,13
5	12,188	20,365	5,078	8,484	3,29	5,497	0,232	0,555	1,708	2,854	0,639	0,734
6	26,775	44,753	12,073	18,508	8,138	11,932	0,696	1,33	3,668	6,132	0,913	1,526
7	16,62	27,784	6,682	11,172	4,224	7,062	0,363	0,773	2,087	3,489	0,454	0,758
8	42,788	71,515	17,09	28,565	10,751	17,97	0,24	0,402	5,258	8,788	1,202	1,841
9	38,222	37,717	9,161	8,053	4,48	4,421	0,536	0,726	1,321	1,304	0,211	0,208
10	4,408	4,35	0,872	0,861	0,456	0,45	0,08	0,079	0,115	0,113	0,018	0,018
11	4,096	4,044	0,778	0,769	0,396	0,391	0,127	0,125	0,091	0,09	0,064	0,063
12	1,367	1,351	0,233	0,23	0,109	0,108	0,034	0,034	0,019	0,019	0,013	0,012

Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 12		Solução 33		Solução 38		Solução 39	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
13	7,991	7,886	1,249	1,233	0,548	0,541	0,179	0,176	0,075	0,074	0,048	0,047
14	4,245	4,189	0,511	0,504	0,177	0,175	0,094	0,093	0,018	0,017	0,021	0,021
15	3,227	3,184	0,365	0,36	0,119	0,117	0,072	0,071	0,015	0,014	0,02	0,02
16	11,226	11,079	1,216	1,2	0,378	0,373	0,202	0,249	0,057	0,056	0,184	0,083
17	3,188	3,147	0,314	0,31	0,087	0,086	0,18	0,178	0,192	0,189	0,144	0,142
18	3,229	3,187	0,54	0,533	0,154	0,152	0,25	0,304	0,333	0,328	0,251	0,248
19	3,815	1,005	0,034	0,009	0,031	0,008	0,039	0,01	0,04	0,011	0,155	0,041
20	1,018	0,268	0,031	0,008	0,028	0,007	0,004	0,001	0,004	0,001	0,025	0,007
21	1,251	0,329	0,006	0,002	0,006	0,001	0,038	0,01	0,039	0,01	0,005	0,001
22	1,143	0,301	0,015	0,004	0,016	0,004	0,015	0,004	0,015	0,004	0,016	0,004
23	0,901	0,237	0,095	0,025	0,088	0,023	0,076	0,02	0,084	0,022	0,078	0,021
24	0,134	0,035	0,113	0,03	0,107	0,028	0,094	0,025	0,103	0,027	0,098	0,026
25	0,16	0,042	0,135	0,036	0,127	0,033	0,09	0,029	0,121	0,032	0,115	0,03
26	0,216	0,057	0,181	0,048	0,17	0,045	0,108	0,039	0,162	0,043	0,153	0,04
27	0,048	0,027	0,038	0,021	0,034	0,019	0,028	0,016	0,032	0,018	0,029	0,016
28	0,009	0,005	0,007	0,004	0,006	0,004	0,005	0,003	0,006	0,003	0,005	0,003
29	0,022	0,008	0,017	0,006	0,015	0,005	0,012	0,004	0,014	0,005	0,013	0,005
30	0,008	0,004	0,006	0,003	0,005	0,003	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002
31	0,004	0,002	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
32	0,028	0,01	0,027	0,01	0,027	0,01	0,026	0,009	0,027	0,01	0,027	0,01
33	0,017	0,009	0,017	0,009	0,017	0,009	0,016	0,009	0,016	0,009	0,016	0,009
34	0,008	0,004	0,007	0,004	0,007	0,004	0,007	0,004	0,007	0,004	0,007	0,004
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0,057	0,032	0,056	0,031	0,056	0,031	0,054	0,03	0,055	0,031	0,055	0,031
37	0,654	0,172	0,641	0,169	0,636	0,168	0,017	0,005	0,631	0,166	0,625	0,165
38	0,657	0,173	0,643	0,169	0,638	0,168	0,006	0,002	0,633	0,167	0,627	0,165
39	0,045	0,025	0,044	0,024	0,043	0,024	0,035	0,019	0,043	0,024	0,043	0,024
40	0,007	0,004	0,006	0,004	0,006	0,004	0,006	0,003	0,006	0,004	0,006	0,004
41	0,063	0,017	0,061	0,016	0,06	0,016	0,014	0,004	0,06	0,016	0,059	0,016
42	0,011	0,006	0,011	0,006	0,011	0,006	0,022	0,012	0,011	0,006	0,011	0,006
43	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,029	0,016	0,001	0	0,001	0
44	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,164	0,203	0,001	0,001	0,001	0,001
45	0,195	0,109	0,186	0,104	0,183	0,102	0,242	0,135	0,18	0,1	0,176	0,098
46	0,08	0,045	0,076	0,043	0,075	0,042	0,101	0,112	0,074	0,041	0,092	0,04
47	0,113	0,063	0,108	0,06	0,106	0,059	0,06	0,034	0,104	0,058	0,172	0,057
48	0,014	0,008	0,013	0,007	0,013	0,007	0,01	0,005	0,013	0,007	0,012	0,007
49	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002
50	6,804	6,714	4,504	4,444	2,854	2,816	0,002	0,002	1,604	1,583	0,22	0,218
51	2,015	1,989	1,304	1,287	0,799	0,788	0,007	0,007	0,424	0,419	0,039	0,039

Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 12		Solução 33		Solução 38		Solução 39	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
52	6,451	6,367	4,083	4,03	2,418	2,386	0,071	0,07	1,211	1,196	0,07	0,07
53	1,889	1,865	1,17	1,155	0,669	0,66	0,003	0,003	0,315	0,311	0,011	0,011
54	1,787	1,763	1,092	1,077	0,611	0,603	0,008	0,008	0,276	0,272	0,008	0,008
55	1,789	1,766	0,989	0,977	0,465	0,459	0,012	0,012	0,144	0,142	0,012	0,012
56	0,843	0,832	0,457	0,451	0,207	0,204	0,054	0,053	0,058	0,058	0,056	0,056
57	0,459	0,256	0,105	0,059	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
58	0,152	0,085	0,002	0,001	0,1	0,056	0,09	0,051	0,098	0,055	0,094	0,053
59	0,107	0,06	0,101	0,056	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
60	0,067	0,037	0,063	0,035	0,008	0,005	0,007	0,004	0,008	0,004	0,008	0,004
61	0,066	0,037	0,062	0,035	0,016	0,009	0,014	0,008	0,015	0,009	0,015	0,008
62	0,179	0,064	0,169	0,061	0,09	0,032	0,081	0,029	0,088	0,032	0,085	0,03
63	0,064	0,023	0,06	0,022	0,058	0,021	0,053	0,019	0,057	0,02	0,055	0,02
64	0,01	0,004	0,01	0,004	0,01	0,003	0,009	0,003	0,009	0,003	0,009	0,003
65	0,027	0,007	0,025	0,007	0,025	0,006	0,023	0,006	0,024	0,006	0,023	0,006
66	0,008	0,002	0,008	0,002	0,008	0,002	0,007	0,002	0,007	0,002	0,007	0,002
67	0,003	0,002	0,003	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001
68	0,019	0,01	0,017	0,01	0,017	0,009	0,015	0,009	0,017	0,009	0,016	0,009
69	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002
70	0,084	0,047	0,077	0,043	0,075	0,042	0,068	0,038	0,073	0,041	0,071	0,039
71	0,024	0,013	0,022	0,012	0,021	0,012	0,019	0,011	0,021	0,012	0,02	0,011
72	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
73	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002
74	0,008	0,004	0,005	0,003	0,005	0,003	0,004	0,002	0,005	0,003	0,004	0,002
75	0,153	0,086	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
76	0,054	0,03	0,048	0,027	0,047	0,026	0,043	0,024	0,045	0,025	0,044	0,025
77	0,135	0,048	0,121	0,043	0,118	0,042	0,107	0,038	0,114	0,041	0,11	0,04
78	0,037	0,02	0,033	0,018	0,032	0,018	0,029	0,016	0,031	0,017	0,03	0,017
79	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
80	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0
81	1,404	0,504	0,827	0,297	0,143	0,051	0,627	0,261	0,776	0,279	0,134	0,048
82	0,269	0,15	0,147	0,082	0,014	0,008	0,13	0,072	0,138	0,077	0,013	0,007
83	0,051	0,029	0,046	0,026	0,018	0,01	0,04	0,023	0,043	0,024	0,017	0,009
84	0,012	0,007	0,011	0,006	0,049	0,027	0,009	0,005	0,01	0,006	0,046	0,026
85	0,041	0,023	0,036	0,02	0,035	0,02	0,032	0,018	0,034	0,019	0,033	0,018
86	0,054	0,019	0,262	0,094	0,255	0,091	0,23	0,083	0,246	0,088	0,239	0,086
87	0,018	0,01	0,016	0,009	0,015	0,009	0,014	0,008	0,015	0,008	0,014	0,008
88	0,085	0,031	0,074	0,027	0,072	0,026	0,065	0,023	0,07	0,025	0,068	0,024
89	0,015	0,005	0,013	0,005	0,012	0,004	0,011	0,004	0,012	0,004	0,012	0,004
90	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 12		Solução 33		Solução 38		Solução 39	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
91	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0,001	0,001	0,001
92	0,063	0,017	0,055	0,014	0,053	0,014	0,048	0,013	0,051	0,014	0,05	0,013

Tabela D.1 – Perdas activas e reactivas nos vários ramos da rede de 94 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 12, 33, 38 e 39).

Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 12 V[pu]	Solução 33 V[pu]	Solução 38 V[pu]	Solução 39 V[pu]		Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 12 V[pu]	Solução 33 V[pu]	Solução 38 V[pu]	Solução 39 V[pu]
0	1,000	1	1	1	1	1		47	0,933	0,955	0,963	1,005	0,972	0,983
1	0,996	0,997	0,998	1	0,998	0,999		48	0,932	0,955	0,962	1,005	0,971	0,982
2	0,993	0,995	0,996	1	0,997	0,998		49	0,932	0,955	0,962	1,005	0,971	0,982
3	0,986	0,991	0,992	1	0,994	0,996		50	0,932	0,954	0,962	1,005	0,971	0,982
4	0,978	0,985	0,987	1,001	0,99	0,993		51	0,929	0,952	0,961	1,003	0,97	0,983
5	0,969	0,979	0,982	1,001	0,986	0,991		52	0,927	0,951	0,96	1,003	0,97	0,983
6	0,964	0,976	0,98	1,002	0,984	0,99		53	0,922	0,947	0,956	1,004	0,967	0,982
7	0,955	0,97	0,975	1,003	0,981	0,988		54	0,921	0,946	0,955	1,004	0,967	0,982
8	0,949	0,966	0,972	1,003	0,978	0,987		55	0,919	0,944	0,955	1,004	0,966	0,982
9	0,934	0,956	0,964	1,003	0,973	0,984		56	0,917	0,943	0,954	1,003	0,965	0,982
10	0,914	0,947	0,957	1,001	0,969	0,983		57	0,916	0,942	0,953	1,003	0,965	0,982
11	0,912	0,946	0,956	1,001	0,968	0,983		58	0,915	0,942	0,953	1,003	0,965	0,982
12	0,909	0,945	0,955	1,001	0,968	0,982		59	0,915	0,942	0,953	1,004	0,965	0,982
13	0,908	0,944	0,955	1,001	0,968	0,982		60	0,914	0,941	0,954	1,004	0,966	0,982
14	0,904	0,942	0,954	1	0,967	0,982		61	0,914	0,941	0,954	1,004	0,966	0,982
15	0,901	0,941	0,953	1	0,967	0,982		62	0,913	0,941	0,954	1,004	0,966	0,983
16	0,899	0,941	0,953	1	0,967	0,982		63	0,912	0,939	0,955	1,005	0,967	0,983
17	0,891	0,938	0,951	0,999	0,967	0,982		64	0,912	0,939	0,954	1,004	0,966	0,983
18	0,889	0,937	0,951	0,999	0,967	0,982		65	0,912	0,939	0,954	1,004	0,966	0,983
19	0,886	0,936	0,95	0,998	0,966	0,981		66	0,914	0,947	0,957	1,001	0,968	0,982
20	0,881	0,936	0,95	0,998	0,966	0,98		67	0,914	0,946	0,956	1,001	0,968	0,982
21	0,880	0,936	0,95	0,998	0,966	0,98		68	0,911	0,946	0,956	1,001	0,968	0,983
22	0,878	0,936	0,95	0,999	0,967	0,98		69	0,909	0,945	0,955	1	0,968	0,982
23	0,876	0,936	0,95	0,999	0,967	0,98		70	0,909	0,944	0,955	1	0,968	0,982
24	0,874	0,935	0,949	0,998	0,966	0,98		71	0,903	0,942	0,953	1	0,967	0,981
25	0,873	0,935	0,949	0,998	0,966	0,979		72	0,903	0,942	0,953	0,999	0,967	0,981
26	0,873	0,934	0,948	0,997	0,965	0,979		73	0,901	0,941	0,953	1	0,967	0,982

Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 12 V[pu]	Solução 33 V[pu]	Solução 38 V[pu]	Solução 39 V[pu]	Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 12 V[pu]	Solução 33 V[pu]	Solução 38 V[pu]	Solução 39 V[pu]
27	0,872	0,933	0,947	0,996	0,964	0,978	74	0,891	0,938	0,951	0,999	0,967	0,982
28	0,871	0,933	0,947	0,996	0,964	0,977	75	0,889	0,937	0,951	0,999	0,967	0,982
29	0,871	0,933	0,947	0,996	0,964	0,977	76	0,888	0,937	0,951	0,999	0,967	0,982
30	0,871	0,932	0,947	0,996	0,964	0,977	77	0,888	0,937	0,951	0,998	0,967	0,982
31	0,871	0,932	0,946	0,996	0,963	0,977	78	0,887	0,936	0,95	0,998	0,966	0,981
32	0,870	0,932	0,946	0,996	0,963	0,977	79	0,887	0,936	0,949	0,997	0,965	0,98
33	0,977	0,985	0,987	1	0,99	0,993	80	0,887	0,936	0,949	0,997	0,965	0,98
34	0,977	0,985	0,987	1	0,99	0,993	81	0,887	0,936	0,949	0,997	0,965	0,98
35	0,977	0,985	0,987	1	0,99	0,993	82	0,884	0,934	0,949	0,996	0,964	0,98
36	0,977	0,985	0,987	1	0,99	0,993	83	0,883	0,934	0,949	0,996	0,964	0,98
37	0,968	0,979	0,982	1,001	0,986	0,991	84	0,883	0,934	0,95	0,996	0,963	0,98
38	0,967	0,977	0,98	1,001	0,984	0,989	85	0,883	0,934	0,95	0,995	0,963	0,981
39	0,964	0,975	0,978	1,001	0,982	0,987	86	0,879	0,935	0,949	0,998	0,966	0,98
40	0,964	0,974	0,978	1,001	0,982	0,986	87	0,875	0,937	0,951	1	0,968	0,981
41	0,964	0,974	0,978	1,001	0,981	0,986	88	0,874	0,935	0,949	0,998	0,966	0,979
42	0,955	0,97	0,974	1,003	0,98	0,988	89	0,873	0,934	0,949	0,998	0,966	0,979
43	0,954	0,969	0,974	1,003	0,98	0,987	90	0,873	0,934	0,948	0,997	0,965	0,979
44	0,954	0,969	0,974	1,003	0,98	0,987	91	0,873	0,934	0,948	0,997	0,965	0,979
45	0,949	0,966	0,972	1,004	0,978	0,987	92	0,873	0,934	0,948	0,997	0,965	0,979
46	0,933	0,956	0,963	1,004	0,972	0,983	93	0,871	0,933	0,947	0,996	0,964	0,977

Tabela D.2 – Níveis de tensão na rede de 94 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (soluções 2, 12, 33, 38 e 39)

Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)	Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)
1	1848,5	6,3	3951,5	21	1350	64,95	2180
2	950	122,97	1455	22	1900	5,19	4415
3	1050	104,35	1675	23	1965	5,65	4205
4	926,5	99,22	1755	24	1950	16,08	3380
5	950	83,85	1905	25	1700	29,45	2855
6	1450	38,75	2630	26	1400	42,79	2575
7	1550	25,9	2965	27	1350	71,51	2070
8	1800	18,94	3190	28	1650	22,75	3075
9	1400	54,73	2350	29	1948,5	5,6	4232,2
10	1300	60,56	2250	30	1776,5	10,95	3605
11	1300	48,02	2465	31	1900	5,69	4116,1
12	1098,5	79,74	1980	32	1698,5	7,5	3838,3
13	1172	108,89	1645	33	1900	5	4576,9

Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)		Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)
14	1122	113,28	1565		34	1626,5	13,41	3490
15	1050	75,54	2015		35	1972	7,05	3860
16	1122	92,66	1790		36	1972	6,02	4085
17	1972	6,12	3975		37	1150	68,62	2125
18	1550	34,29	2740		38	1622	45,33	2515
19	1900	9,04	3750		39	1873,6	17,07	3280
20	1100	88,61	1870		40	1872	5,51	4305

Tabela D.3 – Valores das funções objectivo e do atributo PF das soluções da população final da rede de 94 nós.

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	4	0	3	1	0	0	3	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)

Sol.	Tec.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
17	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
19	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
11	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
12	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0
13	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
15	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
16	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
17	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
18	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
19	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0
20	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
21	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	3	1	0	0	3	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
22	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
23	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0
24	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
25	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
26	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
27	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
28	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
29	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
30	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	5	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
31	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	5	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
32	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6	3	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
33	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	3	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
34	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
35	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
36	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
37	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
38	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
39	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	3	1	0	0	3	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
40	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela D.4 – Soluções (população final) da rede de 94 nós (de onde se seleccionaram as soluções 2, 12, 33, 38 e 39).

Resultados obtidos com a rede de 86 nós

Perdas activas e reactivas nos ramos da rede de 86												
Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 3		Solução 20		Solução 22		Solução 40	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
0	56,782	77,865	13,649	21,154	0,318	0,531	5,713	7,881	9,51	14,23	0,208	0,348
1	36,735	61,338	10,337	15,59	0,35	0,585	4,665	6,119	7,402	10,69	0,254	0,424
2	124,771	153,255	22,71	36,291	0,643	1,075	9,225	13,75	15,719	24,60	0,351	0,754
3	118,834	171,363	27,922	44,997	0,99	1,655	11,501	17,551	19,446	30,83	0,528	1,218
4	103,253	138,458	18,349	28,995	0,126	0,211	6,671	9,479	11,37	17,33	0,096	0,161
5	41,073	63,862	8,394	12,354	0,035	0,058	3,061	3,444	5,159	6,949	0,037	0,062
6	58,763	123,696	17,721	27,948	0,098	0,163	5,733	7,912	10,466	15,82	0,144	0,241
7	65,161	138,244	7,437	10,761	0,033	0,055	1,041	1,74	4,025	5,057	0,061	0,102
8	119,235	149,496	13,915	21,586	0,041	0,068	1,342	2,243	6,437	9,087	0,071	0,119
9	56,498	59,444	4,279	3,236	0,124	0,123	1,102	1,087	2,143	1,128	0,125	0,123
10	5,617	13,735	1,124	0,122	0,026	0,026	0,011	0,01	0,011	0,011	0,026	0,026
11	17,623	2,566	0,001	0	0,353	0,054	0	0	0	0	0,252	0,053
12	0,951	0,941	0,003	0,003	0,038	0,037	0,003	0,003	0,003	0,003	0,037	0,037
13	5,556	5,275	0,048	0,048	0,322	0,317	0,05	0,049	0,049	0,048	0,221	0,317
14	1,883	1,796	0,053	0,052	0,005	0,005	0,047	0,046	0,049	0,049	0,005	0,005
15	8,3	1,507	0,206	0,034	0,035	0,006	0,182	0,03	0,193	0,032	0,035	0,006
16	4,609	4,543	0,099	0,097	0,033	0,033	0,087	0,086	0,092	0,091	0,084	0,083
17	0,421	0,366	0,251	0,248	0,219	0,216	0,232	0,229	0,24	0,237	0,22	0,217
18	0,047	0,032	0,022	0,022	0,017	0,017	0,018	0,018	0,02	0,02	0,017	0,017
19	0,065	0,021	0,02	0,005	0,013	0,004	0,015	0,004	0,017	0,005	0,014	0,004
20	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0,171	0,055	0,229	0,06	0,295	0,078	0,032	0,008	0,228	0,06	0,295	0,078
22	1,348	0,36	1,721	0,453	0,085	0,022	0,634	0,167	1,717	0,452	0,085	0,022
23	3,046	0,814	3,345	0,881	0,048	0,013	1,644	0,433	3,336	0,879	0,048	0,013
24	2,817	1,293	2,909	0,766	0,056	0,015	1,848	0,487	2,87	0,756	0,056	0,015
25	0,849	0,49	1,698	0,447	0,123	0,032	0,674	0,178	1,689	0,445	0,122	0,032
26	1,279	0,522	1,391	0,366	0,318	0,084	0,322	0,085	1,384	0,364	0,317	0,084
27	0,797	0,346	0,707	0,395	0,047	0,026	0,047	0,026	0,703	0,393	0,047	0,026
28	0,18	0,31	0,187	0,105	0,01	0,005	0,009	0,005	0,186	0,104	0,01	0,005
29	0,163	0,071	0,214	0,077	0,023	0,008	0,021	0,008	0,213	0,076	0,023	0,008
30	0,497	0,46	0,349	0,195	0,023	0,013	0,341	0,191	0,347	0,194	0,023	0,013
31	1,157	0,709	0,906	0,506	0,075	0,042	0,887	0,496	0,902	0,504	0,075	0,042
32	0,37	0,163	0,257	0,092	0,017	0,006	0,253	0,091	0,255	0,091	0,017	0,006
33	0,023	0,016	0,015	0,009	0,012	0,006	0,015	0,008	0,015	0,009	0,012	0,006
34	0,016	0,03	0,006	0,004	0,046	0,026	0,006	0,004	0,006	0,004	0,046	0,026

Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 3		Solução 20		Solução 22		Solução 40	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0,07	0,043	0,048	0,027	0,046	0,026	0,047	0,026	0,047	0,026	0,046	0,026
37	0,742	0,199	0,559	0,147	0,471	0,124	0,532	0,14	0,538	0,142	0,47	0,124
38	0,801	0,141	0,555	0,146	0,06	0,016	0,531	0,14	0,537	0,141	0,059	0,016
39	0,054	0,022	0,039	0,022	0,051	0,029	0,036	0,02	0,037	0,02	0,051	0,029
40	0,007	0,003	0,006	0,003	0,165	0,092	0,01	0,006	0,01	0,006	0,165	0,092
41	0,106	0,026	0,086	0,023	0,007	0,002	0,078	0,02	0,105	0,028	0,084	0,022
42	0,023	0,013	0,019	0,011	0,001	0,001	0,018	0,01	0,03	0,017	0,073	0,041
43	0,005	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,01	0,006	0,021	0,012
44	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,002	0,001	0,001
45	0,393	0,244	0,309	0,172	0,195	0,109	0,048	0,027	0,303	0,169	0,214	0,12
46	0,612	0,099	0,568	0,084	0,027	0,004	0,038	0,006	0,558	0,082	0,047	0,007
47	0,287	0,176	0,243	0,136	0,038	0,021	0,023	0,013	0,251	0,14	0,038	0,021
48	0,037	0,012	0,013	0,008	0,079	0,044	0,013	0,007	0,013	0,007	0,079	0,044
49	0,007	0,002	0,008	0,002	0,046	0,012	0,008	0,002	0,008	0,002	0,046	0,012
50	13,896	18,942	4,312	4,255	0,009	0,009	0,206	0,204	1,514	1,494	0,207	0,204
51	3,41	3,341	0,753	0,743	0,009	0,009	0,022	0,022	0,142	0,141	0,021	0,021
52	11,161	10,626	3,263	2,234	0,336	0,332	0,027	0,027	0,345	0,341	0,026	0,026
53	18,945	3,146	4,763	0,614	0,434	0,071	0,017	0,003	0,448	0,073	0,016	0,003
54	3,142	2,845	0,591	0,584	0,234	0,231	0,064	0,063	0,249	0,245	0,057	0,057
55	3,415	3,343	0,438	0,432	0,112	0,111	0,423	0,418	0,119	0,117	0,294	0,389
56	1,674	1,642	0,208	0,205	0,051	0,05	0,194	0,191	0,053	0,052	0,188	0,185
57	1,343	0,714	0,101	0,057	0,002	0,001	0,094	0,053	0,003	0,002	0,092	0,051
58	0,646	0,382	0,144	0,081	0,129	0,072	0,134	0,075	0,138	0,077	0,129	0,072
59	0,555	0,396	0,102	0,057	0,091	0,051	0,095	0,053	0,098	0,055	0,091	0,051
60	0,243	0,089	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0
61	0,219	0,099	0,13	0,073	0,116	0,065	0,121	0,068	0,124	0,069	0,116	0,065
62	0,49	0,18	0,389	0,14	0,348	0,125	0,362	0,13	0,372	0,133	0,248	0,125
63	0,124	0,081	0,171	0,061	0,153	0,055	0,159	0,057	0,164	0,059	0,153	0,055
64	0,116	0,043	0,092	0,033	0,082	0,03	0,086	0,031	0,088	0,032	0,082	0,03
65	0,033	0,01	0,027	0,007	0,024	0,006	0,025	0,007	0,025	0,007	0,024	0,006
66	0,01	0,003	0,008	0,002	0,007	0,002	0,008	0,002	0,008	0,002	0,007	0,002
67	0,043	0,025	0,033	0,018	0,03	0,017	0,031	0,017	0,032	0,018	0,03	0,017
68	0,025	0,013	0,018	0,01	0,016	0,009	0,017	0,009	0,017	0,01	0,016	0,009
69	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002
70	0,167	0,089	0,02	0,011	0,338	0,189	0,355	0,198	0,363	0,203	0,238	0,189
71	0,058	0,027	0,105	0,059	0,095	0,053	0,099	0,056	0,102	0,057	0,095	0,053
72	0,002	0,001	0,087	0,048	0,078	0,044	0,082	0,046	0,084	0,047	0,078	0,044

Ramo	Antes da instalação de equipamentos		Solução 2		Solução 3		Solução 20		Solução 22		Solução 40	
	P(kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
73	0,027	0,014	0,02	0,011	0,018	0,01	0,019	0,01	0,019	0,011	0,018	0,01
74	0,01	0,006	0,007	0,004	0,006	0,004	0,007	0,004	0,007	0,004	0,006	0,004
75	0,176	0,105	0,108	0,061	0,097	0,054	0,103	0,057	0,105	0,059	0,098	0,054
76	0,09	0,032	0,041	0,023	0,037	0,021	0,039	0,022	0,04	0,022	0,037	0,021
77	0,131	0,047	0,095	0,034	0,085	0,031	0,09	0,032	0,092	0,033	0,086	0,031
78	0,026	0,014	0,02	0,011	0,018	0,01	0,019	0,01	0,019	0,011	0,018	0,01
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0,001	0,001	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0
81	1,375	0,439	0,016	0,006	0,015	0,005	0,015	0,005	0,016	0,006	0,015	0,005
82	0,327	0,135	0,02	0,011	0,018	0,01	0,019	0,011	0,019	0,011	0,018	0,01
83	0,015	0,008	0,011	0,006	0,01	0,005	0,01	0,006	0,01	0,006	0,01	0,005
84	0,026	0,006	0,025	0,005	0,025	0,005	0,025	0,005	0,025	0,005	0,025	0,005

Tabela D.5 – Perdas activas e reactivas nos vários ramos da rede de 86 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 3, 20, 22 e 40).

Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 3 V[pu]	Solução 20 V[pu]	Solução 22 V[pu]	Solução 40 V[pu]	Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 3 V[pu]	Solução 20 V[pu]	Solução 22 V[pu]	Solução 40 V[pu]
0	1,00	1	1,000	1,000	1	1	43	0,91	0,965	0,998	0,981	0,974	1
1	0,99	0,996	1,000	0,998	0,997	1	44	0,91	0,965	0,998	0,981	0,974	1
2	0,99	0,994	0,999	0,996	0,995	0,999	45	0,91	0,965	0,998	0,981	0,974	1
3	0,97	0,988	0,998	0,993	0,991	0,999	46	0,90	0,962	0,999	0,981	0,972	0,999
4	0,95	0,981	0,998	0,989	0,985	0,998	47	0,90	0,96	0,999	0,980	0,97	1
5	0,94	0,975	0,998	0,986	0,981	0,999	48	0,90	0,959	0,999	0,980	0,969	1
6	0,93	0,972	0,998	0,985	0,979	0,999	49	0,90	0,959	1,000	0,980	0,969	1,001
7	0,92	0,966	0,998	0,982	0,975	0,999	50	0,90	0,959	1,000	0,980	0,969	1,001
8	0,90	0,963	0,998	0,981	0,973	0,999	51	0,87	0,952	0,998	0,978	0,967	0,998
9	0,88	0,956	0,998	0,979	0,969	0,998	52	0,87	0,951	0,999	0,978	0,966	0,998
10	0,85	0,95	0,997	0,975	0,965	0,997	53	0,86	0,948	0,997	0,978	0,965	0,997
11	0,85	0,949	0,997	0,975	0,965	0,997	54	0,85	0,944	0,996	0,978	0,964	0,997
12	0,84	0,949	0,999	0,975	0,965	0,999	55	0,85	0,943	0,995	0,977	0,963	0,997
13	0,84	0,949	0,999	0,975	0,965	0,999	56	0,85	0,942	0,995	0,976	0,963	0,996
14	0,83	0,95	1,000	0,976	0,966	1	57	0,85	0,942	0,995	0,976	0,963	0,996
15	0,83	0,95	1,000	0,975	0,965	1	58	0,84	0,941	0,995	0,976	0,963	0,995
16	0,83	0,949	1,000	0,974	0,964	1	59	0,84	0,941	0,994	0,975	0,962	0,995

Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 3 V[pu]	Solução 20 V[pu]	Solução 22 V[pu]	Solução 40 V[pu]	Nó	Situação inicial V[pu]	Solução 2 V[pu]	Solução 3 V[pu]	Solução 20 V[pu]	Solução 22 V[pu]	Solução 40 V[pu]
17	0,82	0,948	1,001	0,974	0,964	1	60	0,84	0,94	0,994	0,975	0,962	0,994
18	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999	61	0,84	0,94	0,994	0,975	0,962	0,994
19	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999	62	0,84	0,94	0,993	0,974	0,961	0,994
20	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999	63	0,84	0,938	0,992	0,972	0,959	0,992
21	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999	64	0,84	0,937	0,991	0,972	0,959	0,991
22	0,99	0,995	0,998	0,996	0,996	0,998	65	0,84	0,936	0,990	0,971	0,958	0,991
23	0,99	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	66	0,84	0,936	0,990	0,971	0,958	0,99
24	0,99	1,001	0,999	1,001	1,002	0,999	67	0,84	0,936	0,990	0,970	0,957	0,99
25	1,00	1,003	0,999	1,002	1,005	0,999	68	0,84	0,949	0,999	0,975	0,965	0,999
26	0,97	0,986	0,998	0,992	0,988	0,998	69	0,84	0,949	0,998	0,975	0,965	0,998
27	0,97	0,983	0,997	0,990	0,986	0,997	70	0,84	0,949	0,998	0,975	0,965	0,998
28	0,96	0,981	0,996	0,990	0,983	0,996	71	0,83	0,95	1,001	0,977	0,966	1,001
29	0,96	0,98	0,996	0,990	0,983	0,996	72	0,83	0,951	1,002	0,977	0,967	1,002
30	0,96	0,979	0,996	0,990	0,982	0,996	73	0,83	0,951	1,002	0,978	0,967	1,002
31	0,96	0,98	0,996	0,991	0,983	0,997	74	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999
32	0,97	0,983	0,997	0,994	0,986	0,997	75	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999
33	0,95	0,98	0,998	0,988	0,984	0,998	76	0,82	0,948	1,001	0,974	0,964	1
34	0,95	0,98	0,998	0,988	0,984	0,999	77	0,82	0,948	1,000	0,974	0,963	0,999
35	0,95	0,979	0,998	0,988	0,984	0,999	78	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999
36	0,95	0,979	0,998	0,987	0,984	0,999	79	0,82	0,946	0,999	0,973	0,962	0,998
37	0,94	0,975	0,997	0,986	0,981	0,998	80	0,82	0,946	0,999	0,972	0,962	0,998
38	0,93	0,97	0,999	0,983	0,977	1	81	0,82	0,947	1,000	0,973	0,962	0,999
39	0,92	0,968	0,999	0,981	0,975	1	82	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999
40	0,92	0,968	1,000	0,980	0,975	1,001	83	0,82	0,947	1,000	0,973	0,963	0,999
41	0,92	0,968	1,001	0,980	0,975	1,002	84	0,82	0,947	1,000	0,973	0,962	0,999
42	0,92	0,965	0,998	0,981	0,974	0,999	85	0,99	0,994	0,999	0,996	0,995	0,999

Tabela D.6 – Níveis de tensão na rede de 86 nós antes e depois da aplicação do modelo matemático (Soluções 2, 3, 20, 22 e 40).

Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)	Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)
1	4185,3	8,3	6713,6	26	2950	14,26	5634,5
2	1600	179,9	2226,6	27	1600	167,81	2338,2
3	4667,7	9,26	6478,6	28	1850	145,3	2562,3
4	3350	10,3	6145,3	29	2600	30,74	4800,3
5	2100	135,9	2676,9	30	2600	43,77	4301,4
6	3168,4	9,74	6333,6	31	2865,2	7,98	6886,9
7	2100	85,21	3404,8	32	2100	118,89	2899,8
8	2100	98,26	3191,1	33	2100	80,95	3511,5
9	2600	27,82	4911,9	34	2100	108,32	3061,9
10	2350	103,08	3128,1	35	2100	68,13	3738,5

Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)		Solução	PF (kW)	Perdas (kW)	Custo (10^3 €)
11	3100	12,54	5803,2		36	2350	89,66	3352,7
12	2100	72,1	3631		37	2350	48,41	4187,7
13	2600	76,81	3579		38	2600	24,23	5028,2
14	2450	33,79	4688,2		39	2100	94,35	3286,9
15	3600	11,34	5977		40	3215,2	7,53	7130,3
16	2600	36,64	4537,8		41	2700	20,19	5247,3
17	1600	151,29	2504,8		42	1850	132,04	2781,9
18	2600	17,4	5412,3		43	1950	141,53	2670,3
19	2350	52,04	4078,1		44	2600	40,29	4413,1
20	2350	61,99	3852,3		45	1850	155,37	2451,6
21	2350	57,63	3962,7		46	2600	22,08	5137,3
22	2100	114,29	2953,9		47	2100	124,21	2894,5
23	1600	161,28	2446,1		48	2350	66,95	3851,4
24	2100	126,46	2787,7		49	2100	56,24	4070,3
25	1600	173,72	2335,3		50	2600	16,77	5521,9

Tabela D.7 – Valores das funções objectivo e do atributo PF das soluções da população final da rede de 86 nós.

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	1	0	0	5	3	5	2	0	1	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
1	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
2	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	0	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	1	0	0	5	3	5	2	0	1	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
3	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	2	0	0	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
4	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
5	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	3	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3	1	0	0	0	1	0	0	5	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
6	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
7	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	3	1	0	3	2	2	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
8	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	2	2	1	0	3	2	3	2	2	3	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
9	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	0	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
10	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1	3	0	2	3	0	3	0	0	3	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
11	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	2	2	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
12	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	0	3	1	3	1	1	0	2	3	2	2	3	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
13	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	0	2	0	2	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
14	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	0	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
15	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
16	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
17	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	3	0	2	3	0	3	3	0	3	1	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	2	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
18	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	1	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
19	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
20	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	1	1	0	2	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
21	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	1	1	0	2	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
22	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	3	1	1	2	3	3	2	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
23	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	1	0	0	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
24	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
25	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	3	0	0	0	0	0	2	2	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
26	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
27	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	3	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
28	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	1	2	0	3	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
29	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
30	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	1	0	1	0	0	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	6	0	1	0	0	5	0	1	0	0	0	2	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
31	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	2	1	2	1	1	0	2	0	2	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	1	3	2	3	1	2	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
33	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	3	0	0	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
34	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	1	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
35	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	1	0	2	2	0	3	3	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
36	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	1	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
37	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	3	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
38	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	1	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
39	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	1	3	2	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	3	6	0	1	0	0	5	3	5	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
40	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Sol.	Tec.	Nós da rede onde são instalados os equipamentos (GD, BC e DRA)																																																																																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
41	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	1	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
42	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	3	0	0	2	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
43	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	0	0	2	0	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
44	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	3	0	1	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
45	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	0	0	2	3	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
46	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	1	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
47	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
48	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	2	1	3	1	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
49	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	2	0	1	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	GD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
50	BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	1	0	1	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DRA	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabela D.8 – Soluções (população final) da rede de 86 nós (de onde se seleccionaram as soluções 2, 3, 20, 22 e 40)