
Capítulo 6

Estudo de Caso — Compensação de energia reactiva em redes radiais de distribuição

1. Introdução

Este capítulo apresenta duas abordagens de optimização evolucionária multi-objectivo a um problema de compensação de energia reactiva em redes radiais de distribuição de energia eléctrica. O modelo matemático usado para resolver este problema considera explicitamente duas funções objectivo, a minimização do investimento requerido para o equipamento de compensação e a minimização das perdas (ver Pires (2001) e Pires et al. (2005)).

Na primeira abordagem os valores nominais dos coeficientes das funções objectivo mantêm-se inalterados ao longo do processo de obtenção da frente não dominada (ver Antunes et al. (2004) e Antunes et al. (2005)).

Na segunda abordagem faz-se uma análise de robustez das soluções, considerando que os valores nominais de alguns dos dados associados às funções objectivos e às restrições estão sujeitos a perturbações (ver Barrico e Antunes (2006-a) e Barrico e Antunes (2006-d)).

2. O problema da compensação de energia reactiva em redes de distribuição

2.1. Introdução

A compensação de potência reactiva é um importante problema nos sistemas de energia eléctrica, o qual envolve aspectos operacionais, económicos e de qualidade de serviço. Os consumidores de energia eléctrica (domésticos, industriais, sector dos serviços, etc.) necessitam de potência activa e reactiva, de acordo com as características das cargas.

A função principal de uma rede de distribuição de energia eléctrica é a de fornecer, em cada instante, as potências activa e reactiva requerida pelas cargas, respeitando condições técnicas e de qualidade de serviço. A potência activa é convertida em energia "útil", tal como luz ou calor. A potência reactiva é produzida ou absorvida pela maioria dos componentes do sistema de energia, como geradores, elementos de ligação (linhas e transformadores), cargas e dispositivos de compensação.

A procura de energia reactiva deve-se ao seu consumo por alguns tipos de carga e às perdas do próprio sistema. A energia reactiva deve ser, então, compensada para garantir uma distribuição eficiente da energia activa pelas cargas, reduzindo as perdas e melhorando o factor de potência e o perfil de tensões do sistema. A obtenção destas metas depende da dimensão e da localização dos condensadores (fontes de potência reactiva).

Os dispositivos de compensação mais utilizados em redes de distribuição são os condensadores "shunt" (isto é, condensadores ligados em paralelo com as linhas) fixos ou mecanicamente comutados, uma vez que são os que acarretam menos custos. A função fundamental dos condensadores usados nas redes de distribuição, instalados como unidade única ou em banco, é a de regular a tensão e o fluxo de potência reactiva no ponto onde estão instalados. Os condensadores "shunt" conseguem-no através da mudança do factor de potência da carga, enquanto que os em série fazem-no por compensação directa da reactância indutiva do circuito ao qual estão aplicados. Os condensadores "shunt" fornecem a corrente reactiva requerida pelas cargas indutivas responsáveis pela componente desfasada da corrente do sistema.

Em termos tecnológicos, pode-se transferir potência activa ao longo de grandes distâncias, o que não deve acontecer com a potência reactiva. A potência reactiva deve ser injectada, preferencialmente, a pequenas distâncias do local de consumo, uma vez que o seu transporte implica um aumento nas perdas de transmissão. Assim sendo, a transferência de potência reactiva deve ser minimizada, para reduzir a corrente e evitar

quedas de tensão. Correntes menores implicam perdas activas e reactivas também menores, e a redução de perdas activas representa um ganho económico directo devido à redução do custo de produção.

Assim, é justificada a opção habitual de colocar os condensadores junto dos pontos de carga, uma vez que não é viável, em termos económicos, gerar potência reactiva na central de produção de energia eléctrica para ser entregue a longa distância, nas redes de distribuição, junto da carga.

Dada uma configuração de carga num determinado instante, a análise do trânsito de potência no sistema permite conhecer as grandezas eléctricas em cada ponto do sistema. Deste modo, é possível analisar, quer as condições de funcionamento nesse instante, quer as modificações resultantes de qualquer alteração (por exemplo, a resultante da colocação de baterias de condensadores nalguns nós da rede).

2.2. Colocação de condensadores em sistemas eléctricos

Na literatura científica existe um grande número de modelos e de abordagens metodológicas dedicados ao problema da compensação de energia reactiva. Entre os vários tipos de abordagens para tratar este problema, incluem-se os algoritmos de programação matemática e, mais recentemente, as meta-heurísticas. Em particular, tem sido dada especial atenção a algoritmos genéticos e a abordagens evolucionárias, cujas características são adequadas à obtenção de soluções para problemas com estrutura de rede: Iba (1994), Lee et al. (1995), Kim e You (1999), Levitin et al. (2000), Delfanti et al. (2000), Baran et al. (2001) e Pires et al. (2005).

Nesta secção é apresentada uma abordagem evolucionária para determinar um conjunto de soluções não dominadas do problema da compensação de potência reactiva em redes radiais de distribuição eléctrica.

O modelo matemático usado considera explicitamente duas funções objectivo: minimização dos custos de instalação dos condensadores e minimização das perdas resistivas do sistema. As restrições do modelo estão relacionadas com o nível de tensão requerida nos nós (qualidade de serviço), trânsito de potência (leis físicas em redes eléctricas) e impossibilidade de colocar condensadores nalguns nós (restrições técnicas). A finalidade é identificar as soluções não dominadas do modelo, através da determinação do número e dos locais onde instalar as baterias de condensadores, assim como da dimensão de cada bateria de condensadores a ser instalada, de forma a reduzir as perdas do sistema e melhorar o perfil de tensões. No entanto, é necessário um equilíbrio entre os custos (associados à instalação de novos condensadores) e os aspectos de avaliação técnica e de qualidade de serviço (ver Baran e Wu (1989-a), Baran e Wu (1989-b), Das

et al. (1994) e Pires et al. (2005)). Para mais detalhes sobre este modelo matemático consultar o Anexo.

Existe uma dupla motivação para se usar esta abordagem metodológica. Por um lado, a capacidade de trabalhar, em cada geração, com uma população de potenciais soluções torna as abordagens evolucionárias adequadas a problemas de optimização multi-objectivo, nas quais se pretende identificar um conjunto de soluções não dominadas em vez de uma única solução óptima. Por outro, este problema de natureza combinatória é muito complexo para ser resolvido com ferramentas de programação matemática, uma vez que, para além de considerar múltiplas funções objectivo, é não linear com variáveis contínuas, inteiras e binárias.

A abordagem evolucionária implementada inclui uma estratégia elitista com o objectivo de acelerar a convergência para a frente óptima de Pareto, garantindo que as soluções atingidas são de facto não dominadas e que estão bem distribuídas pela frente. Este aspecto é muito importante em problemas reais, uma vez que é necessário fornecer ao AD soluções bem distribuídas e diversificadas que lhe permita diferentes compromissos para alcançar uma decisão final bem fundamentada.

3. Abordagem sem análise de robustez

3.1. Algoritmo genético

A população usada na implementação do algoritmo genético consiste num conjunto de indivíduos representados por uma cadeia de NN valores inteiros, em que NN é o número de nós da rede eléctrica em estudo. Cada índice da cadeia corresponde a um nó da rede e o valor que lhe está associado identifica o tipo de condensador a instalar nesse nó (o tipo de condensador está indexado por uma cadeia de valores entre 0 e Y, em que 0 significa que não existe qualquer condensador instalado naquele nó; isto é, existem Y condensadores de dimensões diferentes que podem ser instalados na rede).

Usou-se o operador genético cruzamento de dois pontos de corte com uma probabilidade pc. Os dois pontos de corte são escolhidos aleatoriamente com a restrição de estarem a uma distância entre si superior a 1/4 do tamanho do cromossoma (o tamanho de cada cromossoma é NN, ou seja, o número de nós da rede).

Como o tipo de condensador é identificado por um valor inteiro entre 0 e Y, o operador genético mutação consiste em modificar, com uma probabilidade pm, o valor actual por um dos outros Y valores possíveis.

Relativamente à população inicial, à função de aptidão e ao mecanismo de partilha usados, estes são os descritos na secção 4.6.2 do capítulo 4, com as devidas alterações, uma vez que nesta primeira abordagem não é considerada a análise de robustez.

Na implementação do algoritmo genético dedicado ao problema da compensação de potência reactiva, é usada uma estratégia elitista com uma população secundária de tamanho máximo constante, consistindo nos seguintes passos:

- 1) Iniciação: gerar aleatoriamente a população inicial com POP soluções não dominadas;
- 2) Avaliação: determinar o valor da função de aptidão de cada indivíduo da população inicial;
- 3) Determinar a população secundária inicial de tamanho máximo NPS a partir da população inicial: se $NPS \geq POP$, então a população secundária é composta por todos os indivíduos da população inicial; caso contrário, aplicar um mecanismo de partilha aos indivíduos da população inicial para seleccionar NPS soluções;
- 4) População actual ← População inicial
- 5) Construir a população (principal) de tamanho POP, associada à nova geração:
 - a) Introduzir E indivíduos da população secundária (elite) directamente na população principal;
 - b) seleccionar, por torneio, 2 indivíduos da população actual (em cada torneio, escolhem-se aleatoriamente 10% dos indivíduos da população actual e determina-se o melhor deles);
 - c) Aplicar os operadores genéticos cruzamento e mutação aos 2 indivíduos seleccionados e inseri-los na população principal;
 - d) Se a população principal ainda não está completa então regressar ao passo b);
- 6) Avaliação: aplicar o teste de dominância e calcular o valor da função de aptidão de cada indivíduo da população principal;
- 7) Determinar as soluções não dominadas candidatas a pertencerem à população secundária (são todas as soluções não dominadas da população principal que não são dominadas por soluções da população secundária, e vice-versa);
- 8) Actualizar a população secundária, aplicando um mecanismo de partilha se o número de soluções candidatas for superior ao tamanho máximo da população secundária;
- 9) População actual ← População principal;
- 10) Se foi atingido o número de iterações predefinido, então STOP; caso contrário, regressar ao passo 5).

3.2. Rede testada

A metodologia, descrita na secção anterior, para caracterizar a frente óptima de Pareto e ajudar à tomada de decisão foi aplicada a uma rede eléctrica do tipo radial do sistema de distribuição português com 94 nós e 24 alimentadores, distribuídos por um único alimentador principal com 33 nós e 23 alimentadores laterais (Pires (2001)).

Esta rede caracteriza-se por, em períodos de sobrecarga (como é o que está em estudo), apresentar perfis de tensões com valores abaixo dos 0.93 p.u. para a maioria dos nós da rede (apenas 10 dos nós apresentam valores acima de 0.93 p.u.). Este valor é, segundo a legislação portuguesa, o limite inferior do intervalo admissível para o valor da tensão (o valor da tensão de um qualquer nó deve estar entre 0.93 e 1.07), o que significa que as soluções de custo nulo são não admissíveis para esta rede.

As perdas apresentadas por esta rede, quando não há compensação (sem qualquer condensador instalado) e para o cenário de carga considerado para estudo (períodos de sobrecarga), são 0.3204 MW.

3.3. Frente óptima de Pareto

Nos testes realizados neste estudo, consideraram-se apenas três tipos de condensadores para possível instalação ($Y = 3$).

Realizaram-se vários testes com diferentes conjuntos de valores para os parâmetros associados ao algoritmo evolucionário. Os melhores resultados foram obtidos com o seguinte conjunto de valores: POP = 30, NPS = 40, E = 4, pm = 0.1, pc = 1, e número de iterações = 7500.

Cada solução da população secundária está associada a um esquema de compensação definido pela seguinte informação: número e dimensão dos condensadores, nós da rede onde os condensadores são instalados, bem como os correspondentes custo de instalação e perdas resistivas.

A Figura 6.1 mostra a frente óptima de Pareto associada à população secundária final, a qual corresponde ao resultado do processo evolucionário pretendido.

A Figura 6.2 permite fazer uma comparação entre a população inicial (que coincide com a população secundária inicial, devido à característica do algoritmo genético usado) e a população secundária final (que corresponde à frente óptima de Pareto).

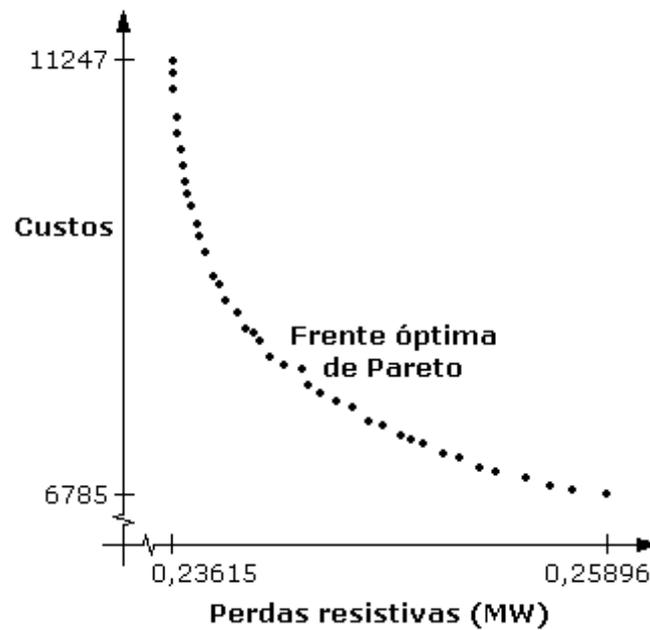


Figura 6.1: População secundária final (frente óptima de Pareto).

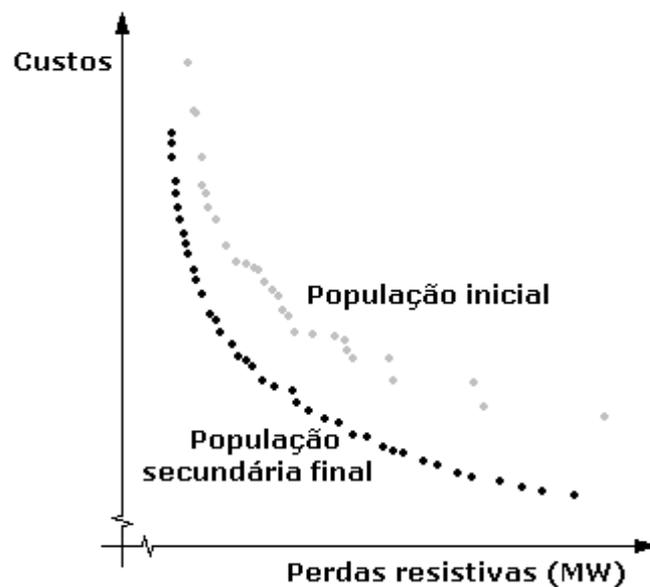


Figura 6.2: População secundária final *versus* população inicial.

3.4. População inicial

De forma a afinar os valores dos parâmetros associados ao algoritmo genético de acordo com as características do caso em estudo, foram implementadas e testadas algumas variantes das técnicas usadas neste algoritmo. Em particular, fizeram-se

experiências usando diferentes estratégias para construir a população inicial. Foram analisadas 3 estratégias diferentes, relacionadas com o tipo de soluções que pertencem à população:

- (A) soluções de qualquer tipo (admissíveis e não admissíveis),
- (B) apenas soluções admissíveis (dominadas e não dominadas),
- (C) apenas soluções admissíveis não dominadas.

Os melhores resultados foram obtidas com a população inicial apenas com soluções admissíveis não dominadas (tipo C). A frente óptima de Pareto obtida pelo algoritmo quando este usa a população inicial do tipo (C) é melhor do que as frentes obtidas quando usa a população inicial do tipo (A) ou (B), quer em termos de dominância, quer em termos de diversidade da frente, como mostram a Figura 6.3 e a Figura 6.4.

A Figura 6.3 mostra as frentes óptimas de Pareto obtidas com as três estratégias diferentes para construção da população inicial. Estas três frentes foram obtidas usando o mesmo conjunto de valores para os parâmetros genéticos (POP = 30, NPS = 40, E = 4, pm = 0.1, pc = 1, e número de iterações = 7500).

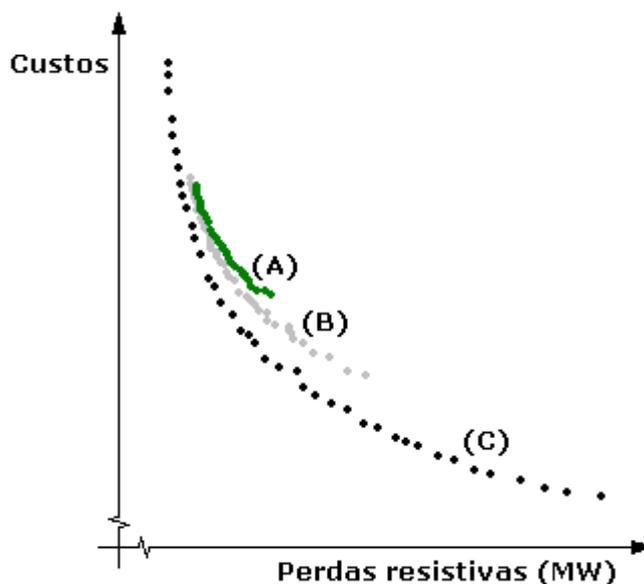


Figura 6.3: Frentes de Pareto (mesmos valores para os parâmetros genéticos).

A Figura 6.4 mostra as três frentes óptimas de Pareto obtidas usando os melhores conjuntos de valores para os parâmetros genéticos em cada uma das estratégias de construção da população inicial (entre todos os conjuntos testados):

- (A): POP = 100; NPS = 40; E = 6; pm = 0.1; pc = 1; número de iterações = 10000;
- (B): POP = 40; NPS = 50; E = 4; pm = 0.1; pc = 1; número de iterações = 7500;
- (C): POP = 30; NPS = 40; E = 4; pm = 0.1; pc = 1; número de iterações = 7500.

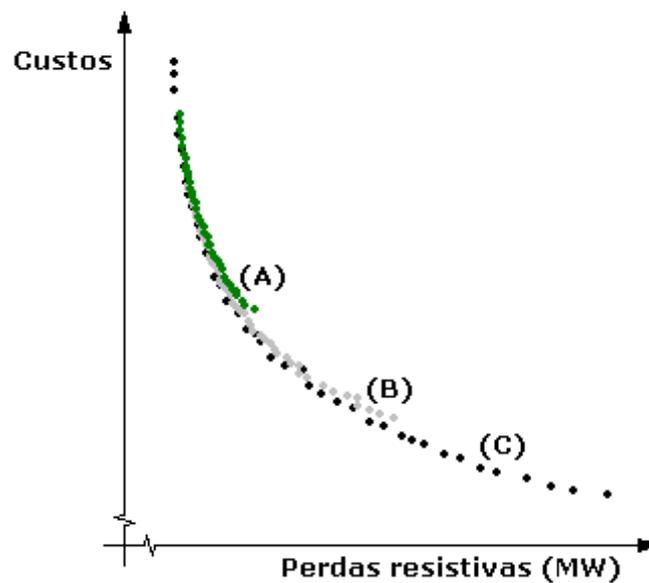


Figura 6.4: Populações secundárias finais (os melhores resultados).

Para a rede de distribuição com 94 nós, os tempos de execução (num Pentium III, 1 GHz, 512 MB de RAM) do algoritmo genético para cada uma das três estratégias de construção da população inicial (em todas os testes foi usado o cruzamento com 2 pontos de corte), foram os seguintes:

- mesmo conjunto de valores (Figura 6.3): 51 s (A), 57 s (B) e 387 s (C);
- melhores resultados obtidos (Figura 6.4): 267 s (A), 100 s (B) e 387 s (C).

No entanto, embora os tempos de execução obtidos com a população inicial do tipo (C) sejam elevados, o tempo de execução médio (sobre 12 execuções) foi de 260 s, o melhor tempo registado foi de 96 s e o pior de 406 s. De referir que os tempos de execução registados incluem o cálculo do trânsito de potência.

4. Abordagem com análise de robustez

Esta abordagem utiliza o conceito de cenário e de cenário de referência (ver secção 4.2 do capítulo 4), baseando-se no comportamento das soluções na vizinhança do cenário de referência, tendo em conta que os dados associados às funções objectivo e às restrições podem sofrer alterações relativamente aos respectivos valores nominais.

A abordagem evolucionária descrita na secção 4.6.2 do capítulo 4 foi adaptada ao problema de compensação de potência reactiva em redes de distribuição eléctrica (ver Antunes et al. (2005)), incorporando o conceito de grau de robustez. O AD pode especificar o tamanho da vizinhança do cenário de referência relativamente, quer aos dados associados às funções objectivo, quer aos próprios valores das funções objectivo.

Os dados associados ao modelo são os seguintes: os custos de instalação e o valor da capacidade de cada tipo de condensador a instalar, a resistência e a indutância de cada ramo (arco) da rede de distribuição e a potência activa e reactiva (carga) em cada nó da rede de distribuição. De referir que os dados associados à função objectivo perdas resistivas também influenciam a admissibilidade das soluções do modelo (restrição 12 do modelo matemático descrito na secção 1 do Anexo). Desta forma, esta abordagem usa uma conjugação das definições de grau de robustez apresentadas para os casos em que as perturbações incidem sobre os dados associados às funções objectivo e às restrições do modelo (secções 4.2 e 4.3 do capítulo 4).

Neste estudo, assume-se que os dados associados aos custos e às capacidades dos condensadores a instalar se mantêm inalterados ao longo do processo. Os restantes dados (resistência e indutância dos arcos e potência activa e reactiva nos nós) estão sujeitos a pequenas perturbações, devido às incertezas inerentes às medições e estimativas. Desta forma, a incerteza apenas incide sobre a função objectivo perdas resistivas, pois os custos de instalação dos condensadores associados a uma dada solução são iguais para todos os cenários possíveis, o que não acontece com o valor das perdas resistivas, que podem ser diferentes de cenário para cenário. No entanto, e apesar destes últimos dados estarem sujeitos a perturbações, o processo inicia-se com um conjunto de valores nominais para estes dados, que constituem o denominado cenário de referência, sobre o qual incidem as perturbações.

4.1. Algoritmo genético

A população usada na implementação do algoritmo genético é do mesmo tipo usado para o algoritmo genético associado à abordagem sem robustez (secção 3.1 deste capítulo).

Este algoritmo usa o operador genético cruzamento do tipo uniforme, com probabilidade p_c , em que para cada geração (iteração) do algoritmo evolucionário é criada uma nova máscara. O operador genético mutação consiste em modificar, com uma probabilidade p_m , o valor actual por um dos outros Y valores possíveis (tal como na abordagem sem robustez — ver secção 3.1 deste capítulo).

A abordagem evolucionária incorporando análise de robustez para caracterizar a frente óptima de Pareto foi aplicada a uma rede radial do sistema de distribuição indiano com 28 nós (Das et al. (1994)), a qual tem uma topologia simples, constituída por apenas um alimentador principal com 10 nós e 5 alimentadores laterais.

O objectivo deste estudo é analisar a influência de alguns dos parâmetros associados à análise de robustez (p_1 , p_2 e η) na determinação da frente óptima de Pareto com soluções robustas. Estes parâmetros estão associados ao nível de exigência

da robustez, o qual é especificado pelo AD/analista. 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) determinadas para cenários diferentes (de referência e vizinho deste). Os parâmetros p_1 e p_2 estão associados às percentagens mínimas de cenários vizinhos do cenário de referência que devem ser admissíveis e em que os valores das funções objectivo de uma solução para estes cenários devem pertencer a uma vizinhança dos valores das funções objectivo daquela solução para o cenário de referência, respectivamente.

Os valores de alguns dos parâmetros associados ao algoritmo evolucionário foram os mesmos em todos os testes efectuados. Estes valores são os seguintes (Figura 6.5 - Figura 6.15): POP = 30, NPS = 30, $E = 0.1 \times NPS$, $p_c = 0.95$; $p_m = 0.05$; e número de iterações = 2000.

4.2. Frente não dominada

A Figura 6.5 mostra a frente óptima de Pareto obtida sem considerar a análise de robustez.

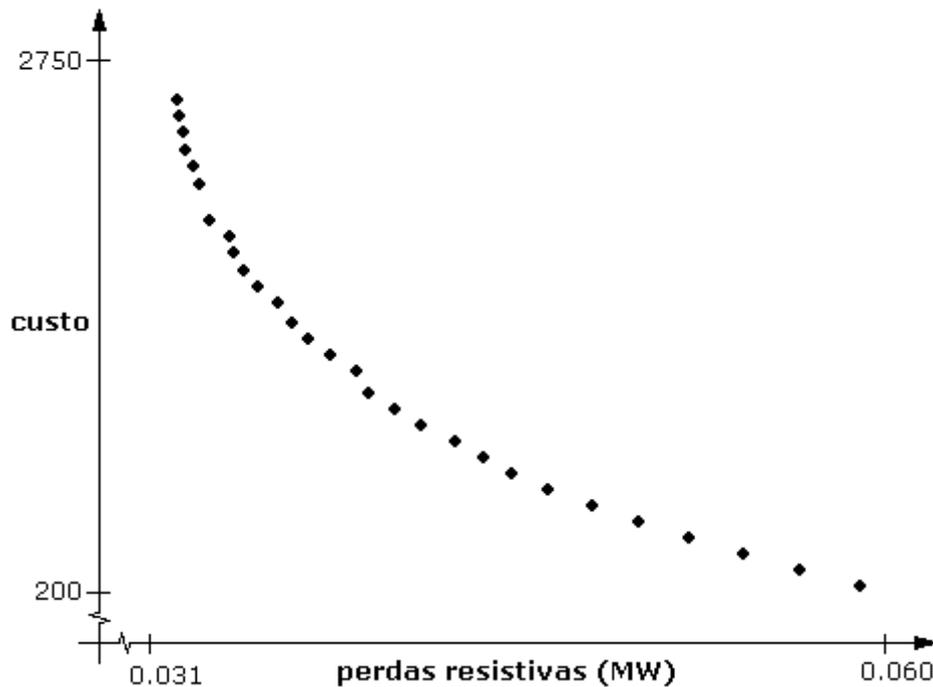


Figura 6.5: Frente óptima de Pareto (sem considerar análise de robustez).

A Figura 6.6 mostra a frente não dominada obtida com os seguintes valores para os parâmetros associados à análise de robustez:

- $p_1 = 100\%$ e $p_2 = 100\%$, para qualquer tipo de soluções,
- $h = 150$,
- $\delta = 0.003$, para a resistência e a reactância dos troços,
- $\delta = 0.03$, para as potências activa e reactiva nos nós,
- $\eta = 0.004$, 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.

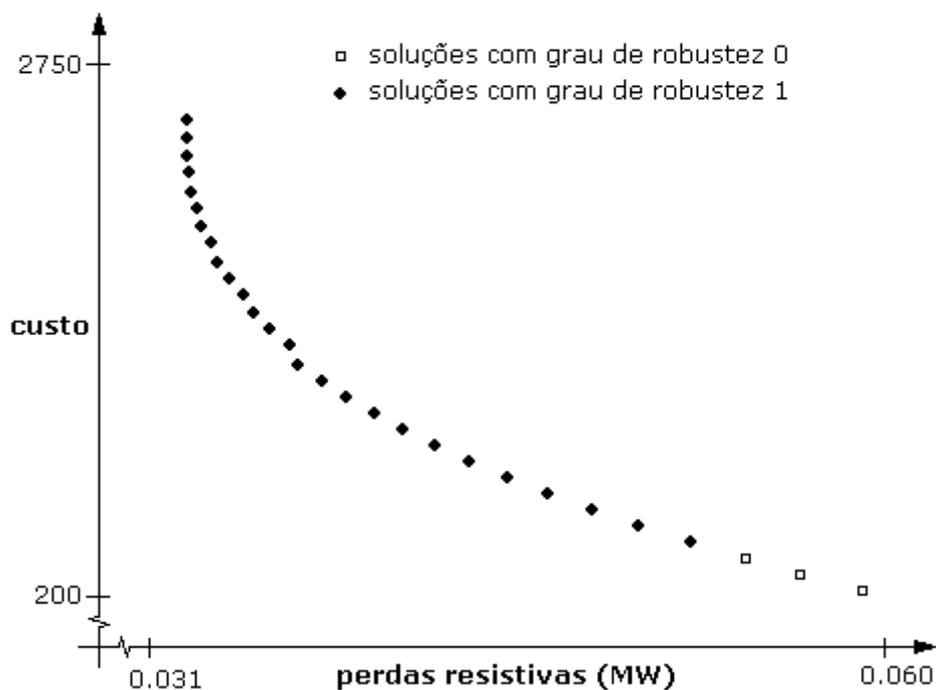


Figura 6.6: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_1 = p_2 = 100\%$ e $\eta = 0.004$).

Para $p_1 = p_2 = 100\%$ (Figura 6.6) a maioria das soluções tem um grau de robustez de valor 1 e apenas um pequeno grupo de soluções próximas do valor óptimo da função objectivo custo tem um grau de robustez 0.

4.3. Análise do parâmetro p_1

Nesta secção é analisada a influência e o comportamento do parâmetro p_1 , o qual está relacionado com a percentagem mínima dos h cenários vizinhos da δ -vizinhança do cenário de referência para os quais uma solução tem que ser admissível. Para tal, é feito variar o valor do parâmetro p_1 para as soluções admissíveis não dominadas ($p_1 = 95\%$ e $p_1 = 90\%$), mas mantendo este parâmetro com o mesmo valor ($p_1 = 100\%$) para as soluções admissíveis dominadas e não admissíveis. Os restantes parâmetros associados à

análise de robustez têm os mesmos valores que foram utilizados para obter a frente apresentada na Figura 6.6 (onde $p_1 = 100\%$ para qualquer tipo de soluções).

Ao relaxar o valor do parâmetro $p_1 = 100\%$ (Figura 6.6) para $p_1 = 95\%$ (Figura 6.7), verifica-se uma diminuição do número de soluções de grau de robustez 0 (na zona onde se encontravam estão agora soluções com grau de robustez 1) e também o aparecimento de soluções com grau de robustez 2, numa zona onde antes existiam apenas soluções com grau de robustez 1.

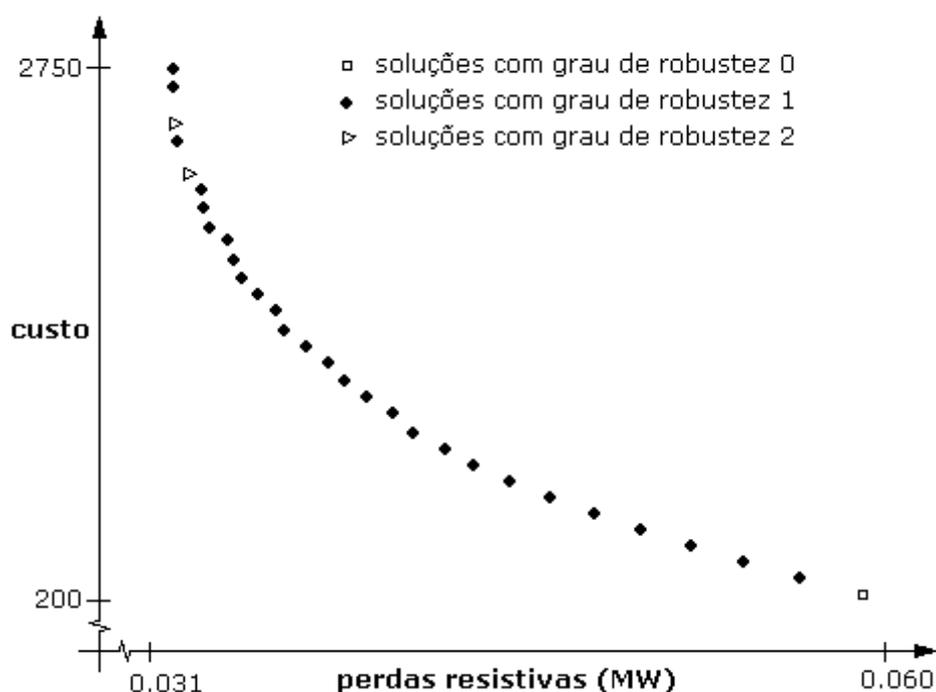


Figura 6.7: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_1 = 95\%$).

Note-se também que, tal como para $p_1 = 100\%$, também agora a zona das soluções com menor grau de robustez se situa na extremidade da frente óptima de Pareto junto ao valor óptimo do custo (isto é, numa zona onde se encontram os piores valores obtidos para as perdas resistivas). Pelo contrário, as soluções com maior grau de robustez (2) surgem na outra extremidade da frente junto aos melhores valores obtidos para as perdas resistivas, isto é, para os piores valores obtidos para o custo.

Relaxando ainda mais o valor do parâmetro p_1 para 90% (Figura 6.8), verifica-se apenas, relativamente à frente obtida com $p_1 = 95\%$, um ligeiro aumento das soluções com grau de robustez 2, à custa das soluções com grau de robustez 1.

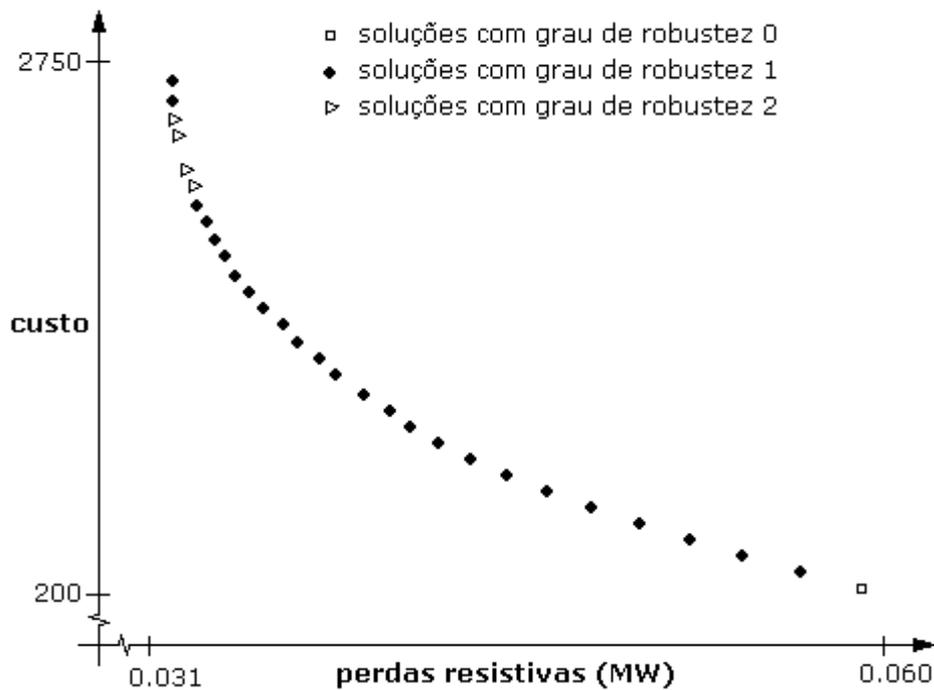


Figura 6.8: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p1 = 90\%$).

4.4. Análise do parâmetro $p2$

A Figura 6.9 e Figura 6.10 apresentam as frentes ótimas de Pareto obtidas para valores predefinidos diferentes para o parâmetro $p2$, associados apenas às soluções admissíveis não dominadas: 95% e 90%, respectivamente. Para as soluções admissíveis dominadas e não admissíveis, $p2 = 100\%$. Os valores para os restantes parâmetros associados à análise de robustez são os mesmos que foram utilizados para obter a frente apresentada na Figura 6.6 (onde $p2 = 100\%$ para qualquer tipo de soluções).

Analisando a frente obtida com $p2 = 95\%$ (Figura 6.9), verifica-se que se mantém, quer o número de soluções de menor grau de robustez (0), quer as suas localizações na frente óptima de Pareto, o que já não acontece com as soluções de grau de robustez 1. De facto, praticamente em toda a região da frente óptima de Pareto onde se encontravam soluções com grau de robustez 1, estão agora soluções com grau de robustez 2 (apenas foi calculada uma solução com grau de robustez 1, que se situa na extremidade da frente junto ao valor óptimo do custo).

Ao relaxar-se ainda mais o valor do parâmetro $p2$ para 90% (Figura 6.10), a frente óptima de Pareto obtida apresenta várias soluções com grau de robustez 3, o que não acontecia nas frentes anteriores (Figura 6.6 e Figura 6.9). Estas soluções com grau de robustez 3 ocupam grande parte da frente óptima de Pareto, desde a extremidade junto

aos melhores valores obtidos para as perdas resistivas. As soluções menos robustas encontram-se mais próximas dos melhores valores obtidos para o custo.

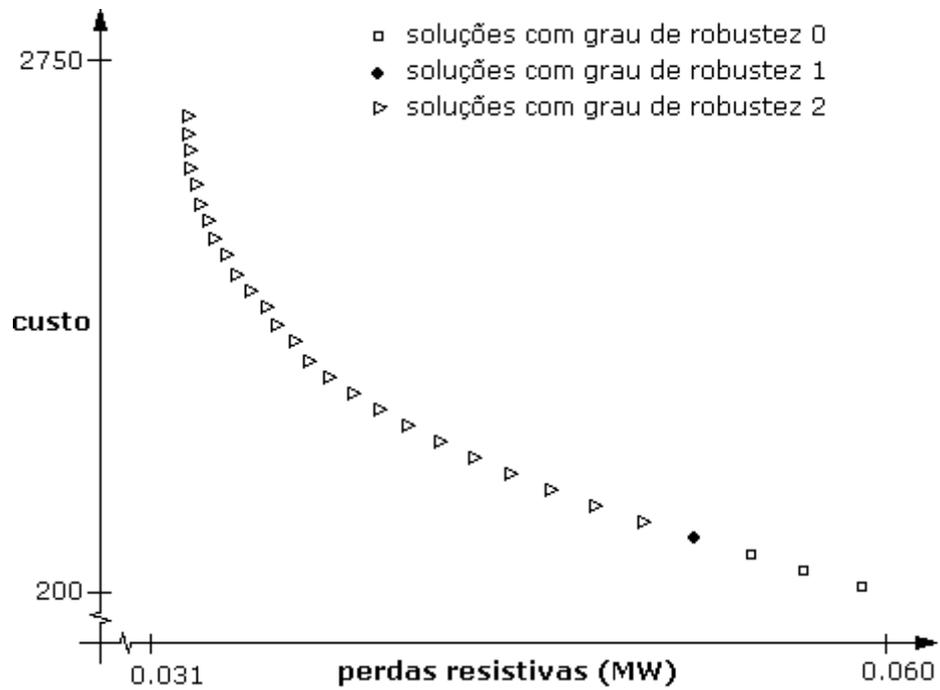


Figura 6.9: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_2 = 95\%$).

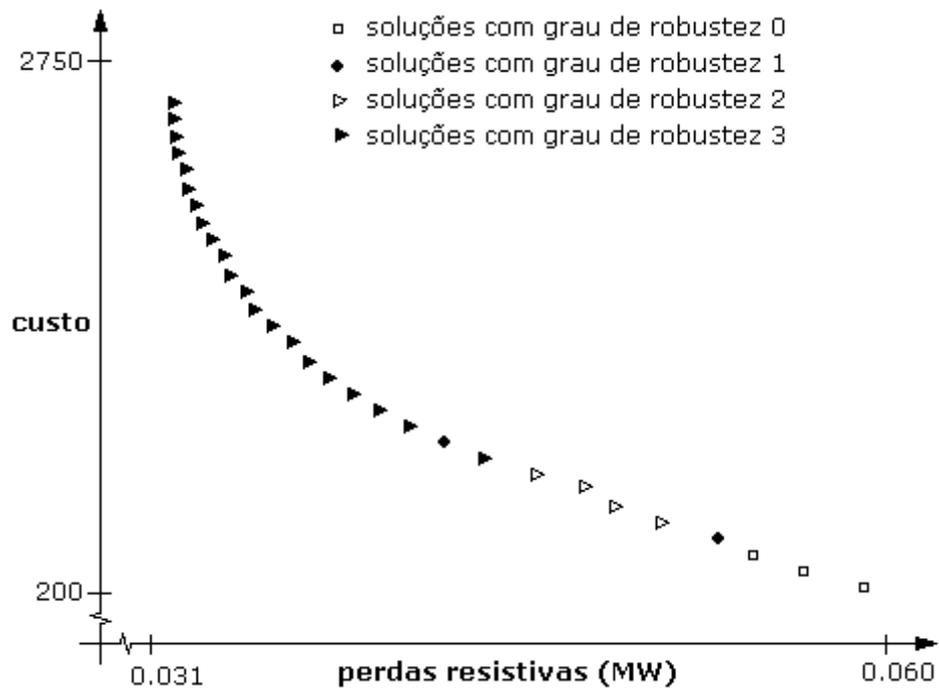


Figura 6.10: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_2 = 90\%$).

Analisando as frentes obtidas com a variação do parâmetro p_2 (Figura 6.6, Figura 6.9 e Figura 6.10), pode-se concluir que as soluções não dominadas mais robustas estão localizadas próximas dos melhores valores para a função objectivo associada às perdas resistivas, e as menos robustas próximas dos melhores valores do custo. O relaxamento do valor do parâmetro p_2 , de uma maneira geral, permite obter uma melhor discriminação, no tocante à robustez, para as soluções da frente óptima de Pareto.

Com a diminuição do valor de p_2 , o nível de exigência da robustez também decresce, fazendo com que as soluções pertencentes às frentes obtidas possam apresentar um espectro maior de graus de robustez, o que pode tornar-se interessante para facilitar o processo de identificação de uma solução de compromisso. No entanto, quanto menor for o valor de p_2 , menor é a fiabilidade do cálculo dos graus de robustez das soluções (isto é, maior é o risco destas terem na realidade um comportamento diferente daquele que é ditado pelo modelo).

4.5. Análise dos parâmetros p_1 e p_2 em conjunto

Nesta secção pretende-se analisar o comportamento dos parâmetros p_1 e p_2 quando visto como um só ($p_1 \oplus p_2$). Isto é, considera-se que um cenário s' pertencente à δ -vizinhança do cenário de referência s , não cumpre com os requisitos impostos, se uma solução x é não admissível para o cenário s' ou a sua imagem para o cenário s' não pertence à η -vizinhança da imagem de x para o cenário s .

A frente obtida com $p_1 \oplus p_2 = 95\%$ (Figura 6.11) é composta por soluções com quatro graus de robustez. No entanto, enquanto que existem poucas soluções com grau de robustez 0, 1 (que se situam em zonas da frente próximas dos melhores valores obtidos para o custo) e 3 (numa zona da frente próxima dos melhores valores obtidos para a função objectivo perdas resistivas), as soluções com grau de robustez 2 são em grande número, ocupando cerca de 70% da extensão da frente de Pareto obtida.

Fazendo $p_1 \oplus p_2 = 90\%$ (Figura 6.12), obtém-se uma frente óptima de Pareto constituída por soluções com graus de robustez de quatro tipos (tal como para o caso anterior). Em comparação com a frente obtida com $p_1 \oplus p_2 = 95\%$ (Figura 6.11), verifica-se que o número de soluções com graus de robustez mais baixos (0 e 1) é semelhante. Por outro lado, verifica-se um aumento substancial de soluções com o grau de robustez 3 (cerca de 75%), que foi alcançado à custa de uma diminuição abrupta do número de soluções com grau de robustez 2.

As soluções com grau de robustez mais elevado (3) ocupam uma zona que vai desde a extremidade próxima dos melhores valores obtidos para a função objectivo perdas resistivas, até uma zona já próxima dos melhores valores obtidos para o custo. As

soluções de menor grau de robustez (0 e 1) continuam a ocupar as zonas extremas da frente de Pareto junto ao melhores valores obtidos para a função objectivo custo.

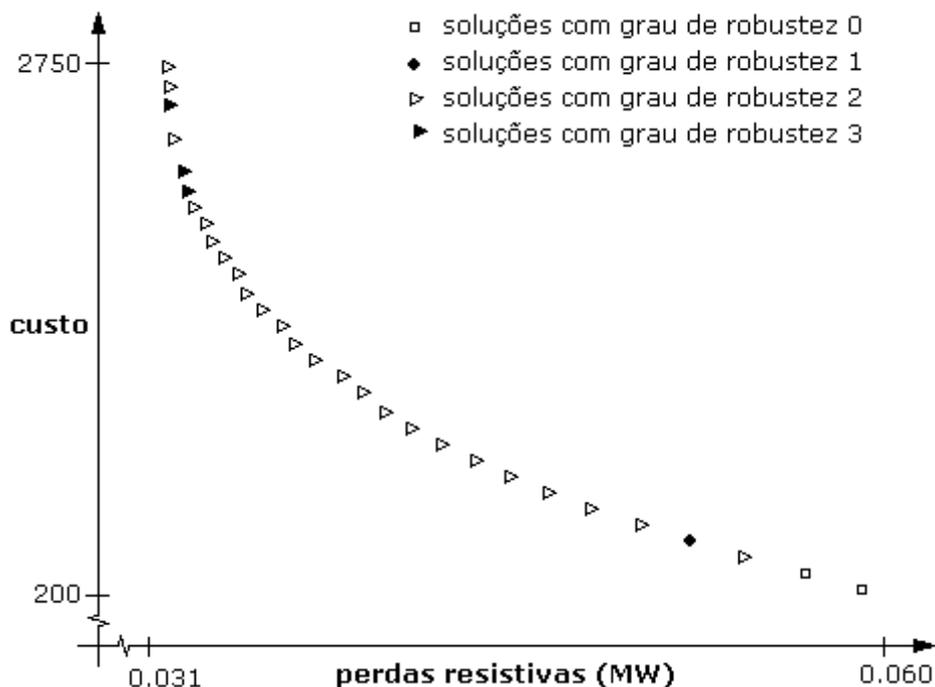


Figura 6.11: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_1 \oplus p_2 = 95\%$).

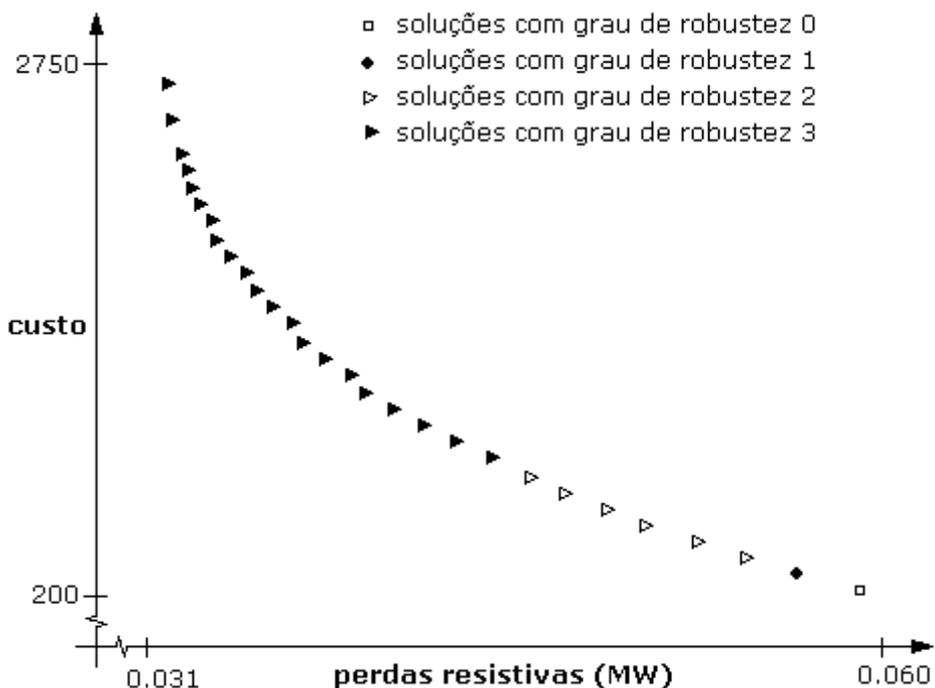


Figura 6.12: Frente de Pareto (com análise de robustez: $p_1 \oplus p_2 = 90\%$).

4.6. Análise do parâmetro η

As Figura 6.13 - Figura 6.15 mostram as soluções não dominadas obtidas com diferentes valores predefinidos associados ao parâmetro $\eta = (\eta_1, \eta_2)$ associado a qualquer tipo de solução (admissível não dominada e dominada, e não admissível): (0.003, 150), (0.005, 150) e (0.006, 150) — os custos de instalação dos condensadores não sofrem qualquer tipo de perturbação. Para os restantes parâmetros associados à análise de robustez, os seus valores são os mesmos que foram usados para obter a frente não dominada da Figura 6.6, onde $\eta = (\eta_1, \eta_2) = (0.004, 150)$.

Neste caso pode-se concluir, pela análise das frentes obtidas, que tal como acontece com o relaxamento dos valores para os parâmetros p_1 e p_2 , ao relaxar-se (aumentar) o valor de η verifica-se também um aumento do número de soluções com grau de robustez mais elevados ou o aparecimento de soluções com maior grau de robustez (Figura 6.14 e Figura 6.15) na frente de Pareto obtida. Pelo contrário, ao introduzir um maior nível de exigência do valor do parâmetro η (correspondendo à diminuição da dimensão da vizinhança no espaço dos objectivos), a frente óptima de Pareto obtida contém menos soluções com os graus mais elevados e mais soluções com os graus de robustez mais baixos (Figura 6.13, com $\eta = (0.003, 150)$).

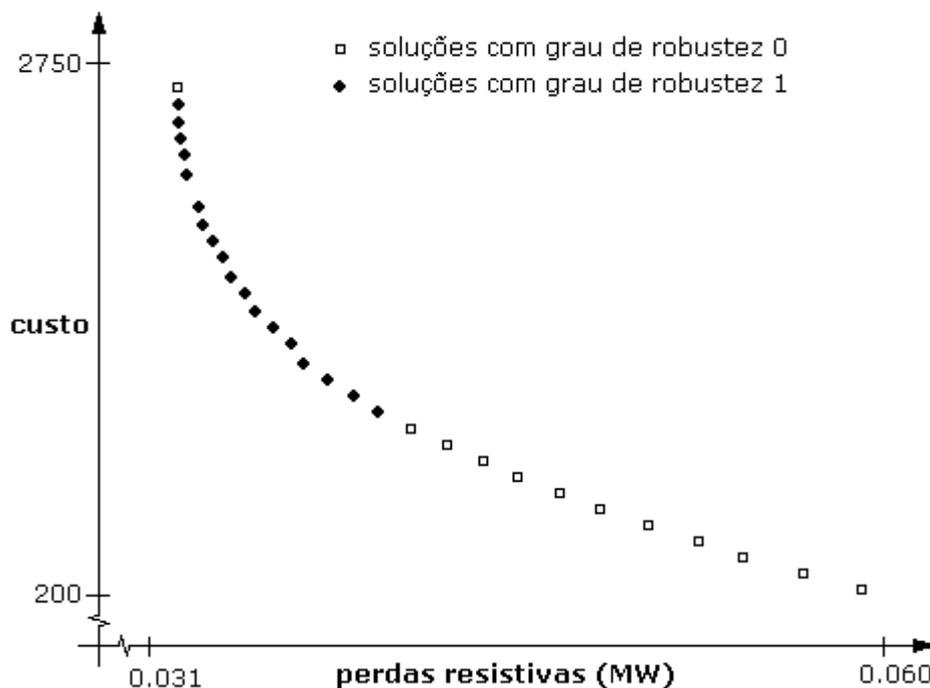


Figura 6.13: Frente de Pareto (com análise de robustez: $\eta = (0.003, 150)$).

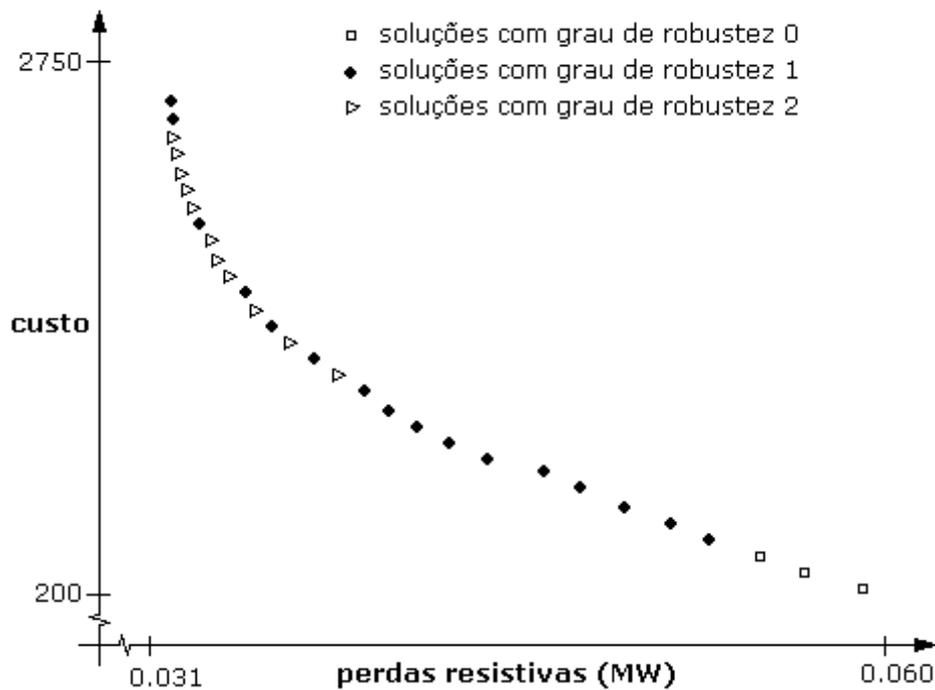


Figura 6.15: Frente de Pareto (com análise de robustez: ($\eta = 0.006, 150$)).

Tal como acontece com a variação dos valores para os parâmetros p_1 e p_2 , também neste caso as soluções com os graus de robustez mais elevados se localizam na extremidade da frente óptima de Pareto, próximas dos melhores valores obtidos para as perdas resistivas, e as soluções com graus de robustez mais baixos se situam mais próximas dos melhores valores obtidos para o custo.

4.7. Conclusão

Neste capítulo pretendeu-se avaliar a importância da realização de uma análise de robustez a um problema real, usando a abordagem apresentada na secção 4 do capítulo 4. Para tal, implementou-se um algoritmo genético para resolver um problema de compensação de potência reactiva num sistema radial de distribuição de energia eléctrica, usando o mesmo modelo que foi utilizado para a abordagem anterior (que não considerava a análise de robustez).

Foram realizadas várias experiências com diversas combinações de valores dos parâmetros associados à análise de robustez (p_1 , p_2 e η). Na primeira, correspondente ao nível máximo de exigência do AD ($p_1 = p_2 = 100\%$ e $\eta = 0.004$), a frente óptima de Pareto obtida apresenta uma tendência para que as soluções menos robustas se situem na extremidade da frente com valores muito próximos dos melhores valores da função objectivo custo.

Com o relaxamento dos valores para os parâmetros p_1 e p_2 , esta tendência persiste e nota-se agora que as soluções mais robustas se situam numa zona muito próxima da outra extremidade onde predominam os melhores valores para a função objectivo perdas resistivas. No entanto, quando se relaxa p_1 e p_2 para os mesmos valores (90% e 95%), verifica-se que, para o primeiro caso (Figura 6.7 e Figura 6.8), o número de soluções de grau máximo da frente óptima de Pareto é menor do que para o segundo caso (Figura 6.9 e Figura 6.10).

Quando se relaxam os valores dos parâmetros p_1 e p_2 em conjunto ($p_1 \oplus p_2$), nota-se que as características da frente óptima de Pareto (Figura 6.11 e Figura 6.12) são semelhantes às da frente óptima de Pareto obtida quando se relaxa apenas o parâmetro p_2 . Este facto indicia que a influência do parâmetro p_2 , na classificação das soluções da frente de Pareto por graus de robustez, é mais acentuada do que a influência de p_1 .

O mesmo acontece quando se relaxa (aumenta) o valor do parâmetro η , em que a frente óptima de Pareto apresenta um aumento do número de soluções com graus de robustez mais elevados (Figura 6.14 e Figura 6.15). Pelo contrário, quando se aumenta o nível de exigência (diminuição do valor do parâmetro η), verifica-se que a frente óptima de Pareto apresenta um aumento do número de soluções de menor grau de robustez (Figura 6.13). Em termos de localização das soluções na frente de Pareto, a tendência é a mesma que foi verificada para os casos de p_1 e p_2 , isto é, as soluções mais robustas situam-se numa zona muito próxima da extremidade da frente onde predominam os melhores valores para a função objectivo perdas resistivas.