

Metodologia de Optimização Multiobjectivo para Afecção de Unidades Térmicas num Mercado de Emissões

J.P.S. Catalão¹, S.J.P.S. Mariano¹, V.M.F. Mendes² e L.A.F.M. Ferreira³

¹ Departamento de Engenharia Electromecânica
Universidade da Beira Interior
R. Fonte do Lameiro, 6200-001 Covilhã (Portugal)
e-mail: catalao@ubi.pt, sm@dem.ubi.pt

² Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1950-062 Lisboa (Portugal)
e-mail: vmendes@isel.pt

³ Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa (Portugal)
e-mail: lmf@ist.utl.pt

Resumo. Nesta comunicação é apresentada a formulação matemática para o problema de planeamento da afecção de unidades térmicas, usando combustíveis de origem fóssil, tendo em consideração as emissões poluentes. Este problema é tratado como um problema de optimização multiobjectivo. O método utilizado para a sua resolução obtém pontos extremos eficientes no espaço dos objectivos, permitindo conhecer troços da curva de Pareto. Ainda, é apresentado um caso de estudo e discutidos os resultados obtidos para o suporte da decisão no planeamento da afecção de unidades térmicas em ambiente de mercado de emissões.

Palavras-chave

Afecção de unidades, custo de combustível, emissões poluentes, optimização multiobjectivo, mercado de emissões.

1. Introdução

A sociedade moderna é em parte um resultado da descoberta e do uso da energia eléctrica. A energia eléctrica é de vital importância para a sociedade moderna, influenciando decisivamente não só o bem-estar dos cidadãos mas também a competitividade da economia.

As preocupações ambientais que se manifestaram nas últimas décadas conduziram a políticas internacionais sobre o meio ambiente no sentido da sua preservação. Essas políticas tendem a limitar os danos causados sobre o meio ambiente, impondo a internalização dos custos provenientes do impacte sobre o meio ambiente ocasionado pelas emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa, CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs e SF₆.

A ratificação do Protocolo de Quioto pela Federação Russa foi fundamental para terminar um período de incerteza, originado pelos Estados Unidos terem abandonado em 2001 este protocolo, acordo global de combate às alterações climáticas, tendo o acordo entrado em vigor em 16 de Fevereiro de 2005. Quioto exige aos países da União Europeia a Quinze que entre 2008-2012 reduzam, no conjunto, 8 por cento das suas emissões, relativamente ao que poluíam em 1990, considerado o ano base de referência. Os novos membros têm diferentes obrigações.

A actividade desenvolvida para a satisfação da energia eléctrica necessária à multiplicidade das tarefas constituintes da actividade humana na sociedade moderna é uma das actividades que contribuiu significativamente para o aumento do efeito de estufa.

O contexto actual de liberalização e reestruturação do sector da energia eléctrica e de preocupação ambiental num âmbito mais geral, exige o desenvolvimento de soluções técnicas, tecnologias que mitiguem o dióxido de carbono, e o estabelecimento de compromissos por forma a minimizar os danos causados no nosso habitat, que são devidos à satisfação da energia eléctrica necessária à nossa sociedade.

Consequentemente, o impacte das centrais convencionais que usam combustíveis fósseis, carvão, fuelóleo ou gás, tem que ser considerado de forma a que as emissões dos gases de efeito de estufa sejam admissíveis de acordo com os condicionalismos estabelecidos, considerando o recurso ao mercado de emissões, que é um dos sistemas previstos nos chamados mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Quioto.

O mercado de emissões, estabelecido pela Directiva 2003/87/CE do Parlamento Europeu e do Conselho aprovada em 13 de Outubro de 2003, tem por objectivo contribuir para que os estados membros da Comunidade Europeia cumpram os seus compromissos de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa nos termos do Protocolo de Quioto. Este mercado de emissões — uma bolsa destinada às empresas para mitigar, com menores custos, as suas emissões de gases que provocam o efeito de estufa — começou oficialmente a funcionar em Janeiro de 2005 na União Europeia.

Embora o principal objectivo do mercado de emissões seja garantir que as emissões poluentes se reduzam para cumprir as metas acordadas em Quioto, o mecanismo serve também para promover um uso mais racional da energia eléctrica. Quanto mais as empresas instalarem mecanismos de eficiência energética e de diminuição de poluição, menos necessidade terão de gastar dinheiro na compra de licenças de emissão.

Durante o primeiro período de 2005 a 2007 o mercado de emissões trata apenas o dióxido de carbono proveniente de oito sectores industriais: centrais termoeléctricas, cogeração, refinação, siderurgias, cimentos, pasta e papel, vidro, e cerâmica. O mercado europeu do carbono inclui a compra e venda, de modo totalmente electrónico, do direito de emitir dióxido de carbono para a atmosfera, isto é, da transacção de licenças de emissões. A partir de 2008, novos sectores poderão ser incluídos, abrangendo outros gases de efeito de estufa para além do dióxido de carbono.

A cada indústria serão atribuídas licenças anuais de emissão. No final de cada ano, as empresas têm de possuir licenças suficientes para saldar as emissões poluentes que emitiram. Aquelas que tiverem licenças em falta podem comprá-las a quem emitiu menos e as tenha em excesso.

Assim, dos acordos para a preservação do meio ambiente têm emergindo directivas que requerem a mitigação das emissões poluentes originadas pelas centrais térmicas. Estas directivas conduzem à necessidade de introduzir, nos anteriores modelos matemáticos para o suporte à tomada de decisões, formulações adicionais, conduzindo a metodologias de solução distintas das anteriormente utilizadas.

Alguma investigação tem sido realizada no âmbito da formulação necessária, mais particularmente no que respeita ao problema de despacho económico [1]-[4]. Contudo, o problema de despacho económico visa determinar unicamente a potência a fornecer por cada unidade térmica em serviço. Este problema não decide sobre quais as unidades que devem entrar em serviço e quando, sendo estático. O universo das decisões é constituído pelas unidades afectadas para a operação.

A selecção das unidades térmicas a afectar à operação é um problema hierarquicamente superior ao do despacho económico. Este problema é também resolvido com recurso às técnicas de optimização, mas visa

tradicionalmente satisfazer a carga prevista, minimizando uma função objectivo determinada pelo custo de combustível requerido, sujeita à satisfação da carga pretendida e de restrições técnicas decorrentes do uso e limitações do equipamento instalado.

O problema tradicional para a afectação de unidades é inadequado para a consideração das emissões poluentes. Consequentemente, para ter em consideração as emissões poluentes existe a necessidade de o reformular [5]-[6]. O custo de combustível requerido para a satisfação da procura de energia eléctrica aumenta com a diminuição da emissão poluente, visto que, os combustíveis fósseis mais poluentes são em geral mais económicos. Portanto, a função custo de combustível e a do nível de emissão poluente são por natureza funções conflitantes.

Nesta comunicação é apresentada a formulação matemática para o problema de planeamento da afectação de unidades tendo em consideração as emissões poluentes em ambiente de mercado de emissões. Este problema é tratado por um problema de programação matemática multiobjectivo, obtendo-se um conjunto de soluções não-dominadas ou seja Pareto-óptimas.

Um caso de estudo é apresentado para ilustrar a aplicação da formulação. Este caso consiste na afectação de onze unidades térmicas durante um horizonte temporal de 168 horas, sendo obtida a curva de compromisso entre o custo de combustível e as emissões poluentes, curva de Pareto. Esta curva permite que o gestor possa suportar com racionalidade as suas decisões de acordo com o mercado de emissões.

2. Formulação do Problema

O problema tradicional de planeamento da afectação de unidades térmicas permite determinar a afectação de unidades para a satisfação de uma carga com o mínimo custo de combustível, sendo as decisões tipicamente tomadas em intervalos de uma hora durante um horizonte temporal de um dia até uma semana [7]-[8], isto é, o horizonte temporal é determinado pelo ciclo diário até ao semanal do diagrama de cargas de procura de energia eléctrica.

Este problema envolve um número elevado de variáveis discretas, associadas a estados discretos das unidades, e de variáveis reais. Ainda, envolve um número elevado de restrições que fazem com que este problema seja classificado com um problema de grande escala, dinâmico, de programação não linear inteira mista [9]. O problema é descrito como

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \\ & \text{s. a} \\ & (\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \in F \end{aligned} \quad (1)$$

i.e., minimizar a função objectivo

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_{ik}(x_{ik}, u_{ik}, p_{ik}) \quad (2)$$

sujeito a restrições do tipo global e do tipo local que definem o conjunto das decisões admissíveis, onde K é o número total de horas do horizonte temporal, I é o número total de unidades térmicas no parque de unidades em consideração, C_{ik} é o custo de combustível requerido pela unidade i no período k , incluindo o custo de arranque, caso tenha arrancado neste período, x_{ik} , p_{ik} , u_{ik} são respectivamente a variável de estado, a produção de energia eléctrica, e a variável discreta associada com a unidade i no período k .

As restrições do tipo global podem ser classificadas em: restrições horárias de produção, como por exemplo, a soma da potência eléctrica das unidades tem que satisfazer a demanda D_k determinada pela procura de energia eléctrica em cada hora, escrita pela seguinte restrição de igualdade

$$\sum_{i \in I} p_{ik} = D_k \quad k \in K \quad (3)$$

restrições horárias para conjuntos de unidades (4), como por exemplo, restrições para o limite inferior de potência eléctrica em cada hora para determinados conjuntos de unidades; restrições ao longo do horizonte temporal (5), como por exemplo, limitação da emissão de um conjunto de unidades ao longo do horizonte temporal

$$\sum_{i \in A_j} F_{ji}(x_{ik}, p_{ik}) \geq F_{jk}^{req} \quad j \in J, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in B_n} H_{ni}(x_{ik}, u_{ik}, p_{ik}) \geq H_n^{req} \quad n \in N \quad (5)$$

onde A_j é o conjunto das unidades pertencentes à área j , F_{ji} é a função que descreve a contribuição da unidade i para a satisfação do requisito imposto na área j , F_{jk}^{req} é o limite inferior da contribuição pretendida na área j , J é o conjunto dos índices para as áreas, B_n é o conjunto dos índices para as áreas que determinam a n -ésima restrição cumulativa, H_{ni} é a função que determina a contribuição da unidade i para a n -ésima restrição cumulativa, H_n^{req} é o limite inferior da contribuição pretendida para a n -ésima restrição cumulativa e N é o conjunto dos índices para as restrições cumulativas.

As restrições do tipo local são, por exemplo: as equações de estado para as unidades

$$(x_{i,k+1}, p_{ik}) = A_{ik}(x_{ik}, u_{ik}) \quad u_{ik} \in U_{ik}, i \in I, k \in K \quad (6)$$

determinando o estado seguinte e a potência eléctrica em função das decisões discretas pertencentes ao conjunto das decisões admissíveis U_{ik} da unidade i na hora k , ou a limitação no valor da potência eléctrica para cada unidade

$$p_{ik} \in P_{ik}(u_{ik}) \quad i \in I, k \in K \quad (7)$$

se a unidade está ligada, potência eléctrica entre o valor mínimo e o valor máximo admissível, caso contrário tem valor nulo; o estado inicial x_{i0} e o final x_{if} , pertencentes

respectivamente ao conjunto dos estados iniciais X_i^0 e ao conjunto dos estados finais X_i^f possíveis

$$x_{i0} \in X_i^0 \quad x_{if} \in X_i^f \quad i \in I \quad (8)$$

O conjunto das variáveis de decisão que satisfazem todas as restrições será escrito como

$$F = \{(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}): \text{satisfazer (3), (4)...(8)}\}$$

No caso de estudo, o custo com o uso do combustível numa unidade i é a soma do custo de arranque, que é considerado constante, com o custo de operação

$$C_{ik}(x_{ik}, u_{ik}, p_{ik}) = C_{ik}^{sc}(x_{ik}, u_{ik}) + C_{ik}^{fc}(u_{ik}, p_{ik}) \quad (9)$$

O custo de operação é calculado por

$$C_{ik}^{fc}(u_{ik}, p_{ik}) = u_{ik} (\alpha_i + \beta_i p_{ik} + \gamma_i p_{ik}^2) \quad (10)$$

onde α_i , β_i e γ_i são parâmetros que determinam o custo de operação da unidade i .

O nível de emissão tem duas parcelas: uma associada ao arranque da unidade, e outra à operação calculada por

$$E_{ik}(u_{ik}, p_{ik}) = u_{ik} (a_i + b_i p_{ik} + c_i p_{ik}^2) \quad (11)$$

a primeira é considerada constante no caso de estudo, sendo a_i , b_i e c_i os parâmetros que determinam o nível de emissão poluente da unidade i .

As funções objectivo para o problema são o custo de combustível (2) e o nível de emissão poluente (12)

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} E_{ik}(x_{ik}, u_{ik}, p_{ik}) \quad (12)$$

e o problema de programação matemática multiobjectivo é escrito como

$$\min \{f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}), g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})\}$$

s. a

$$(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \in F \quad (13)$$

Neste problema pelo facto dos objectivos serem conflitantes é impossível obter uma solução que minimize simultaneamente os dois objectivos, sendo necessário estabelecer um compromisso entre os objectivos. O método utilizado para a resolução deste compromisso foi a ponderação das funções objectivo, isto é, o método da soma ponderada das funções objectivo

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = w f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) + (1 - w) \lambda g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (14)$$

onde λ é um factor de escala para as emissões, em unidade económica por unidade de emissão poluente e w é um factor que determina a combinação convexa indicada em (14) satisfazendo a dupla desigualdade

$$0 \leq w \leq 1$$

Ainda, são introduzidas ε -restrições no método de otimização do tipo

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_{ik}^{fc} \leq \varepsilon_C^{req} \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} E_{ik} \leq \varepsilon_E^{req} \quad (16)$$

para determinar a curva de Pareto, visto que, é uma curva não côncava e não convexa.

O método obtém pontos extremos eficientes, pontos não dominados, no espaço dos objectivos e as respectivas variáveis de decisão, soluções de Pareto-óptimas. Os pontos extremos eficientes determinam os troços da curva de Pareto.

3. Caso de Estudo

O caso de estudo é constituído por onze unidades térmicas sendo as decisões tomadas em períodos horários durante um horizonte temporal de 168 horas. Os custos e os níveis de emissões poluentes para o arranque são considerados constantes.

Na Tabela 1 são indicados os parâmetros que determinam o custo e o nível de emissão poluente para a operação das unidades.

Tabela I. Parâmetros para as funções de custo e de nível de emissão poluente para a operação das unidades.

<i>i</i>	<i>Custo</i>			<i>p</i> ^{min} (MW)	<i>p</i> ^{max} (MW)	<i>Emissão</i>		
	α	β	γ			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	1675	18.78	0.013	60	300	25.8	-0.52	0.007
2	1207	18.96	0.018	60	300	26.9	-0.54	0.007
3	2277	19.71	0.010	50	500	30.1	-0.49	0.004
4	2239	21.02	0.009	50	460	30.1	-0.39	0.004
5	2292	20.84	0.010	50	500	25.3	-0.56	0.004
6	2516	19.78	0.012	50	500	25.3	-0.53	0.004
7	1895	20.86	0.019	20	215	23.9	-0.40	0.008
8	1860	22.00	0.015	20	210	23.9	-0.40	0.008
9	1410	20.39	0.049	20	250	31.6	-0.63	0.004
10	1270	17.92	0.077	20	250	34.3	-0.68	0.004
11	1469	19.71	0.077	20	210	22.9	-0.64	0.005
<i>total</i>				420	3695			

A procura de energia eléctrica que tem que ser satisfeita durante o horizonte temporal é a indicada na Figura 1.

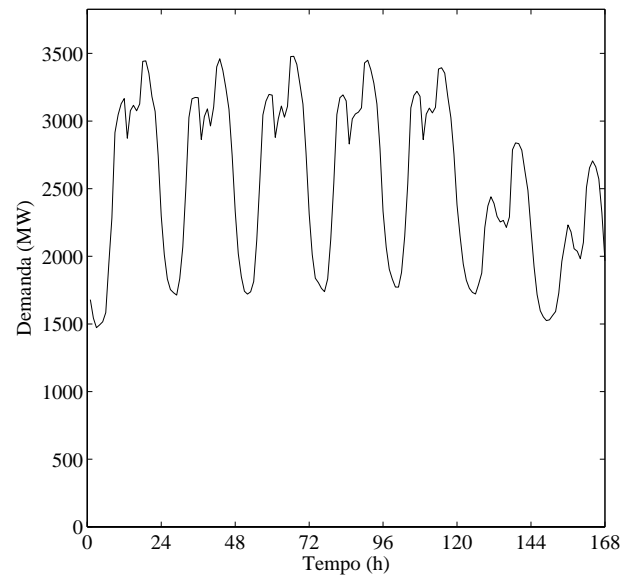


Fig. 1. Diagrama de cargas.

A metodologia de otimização foi implementada e executada em computador, 1.6-GHz, 512 MB RAM, usando linguagem FORTAN.

Na Figura 2, para as unidades 1 a 6, e na Figura 3, para as unidades 7 a 11, os resultados para a melhor afectação de unidades, tendo em consideração só o custo (AUC), são representados a traço contínuo e os resultados para a melhor afectação de unidades, tendo em consideração só as emissões (AUE), são representados a traço interrompido.

Neste caso de estudo, as unidades 1 a 6 têm custos inferiores mas são mais poluentes em comparação com as unidades 7 a 11.

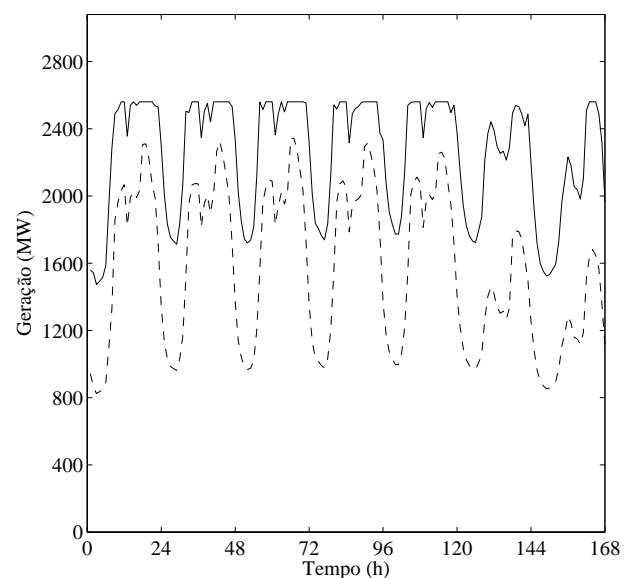


Fig. 2. Produção horária total para as unidades 1 a 6.

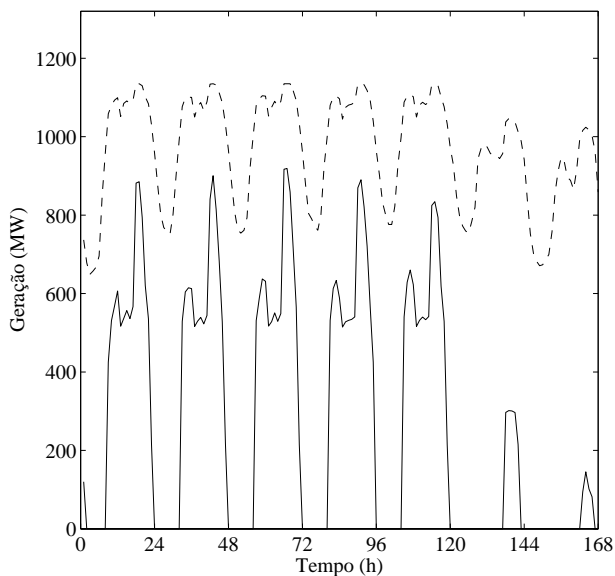


Fig. 3. Produção horária total para as unidades 7 a 11.

Nos resultados para a melhor afectação de unidades tendo em consideração só o custo, apenas as unidades de menor custo são afectadas e tipicamente à potência máxima independentemente das emissões. Consequentemente, não são afectadas as unidades disponíveis com maiores custos.

A melhor afectação de unidades tendo em consideração só o custo segue o perfil da demanda, como é indicado na Figura 4. Inversamente, no caso da melhor afectação de unidades tendo em consideração só as emissões, são afectadas as unidades que permitem obter um nível de emissão mínimo. As unidades mais poluentes ou não são afectadas ou são afectadas com um nível inferior, como no caso em estudo. Consequentemente, existe um aumento no custo, como está indicado na Tabela II.

Tabela II. Resultados comparativos.

	Custo total (\$)	Produção total (GW)	Emissão total (Gg)
AUC	12998277	425.608	600.919
AUE	14614991	425.608	348.329

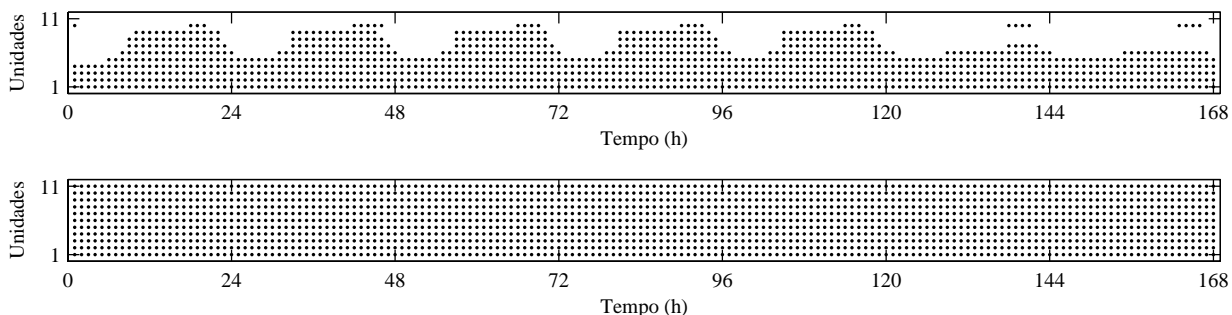


Fig. 4. Estrutura matricial representando o estado das unidades térmicas para AUC e AUE.

A melhor afectação de unidades tendo em consideração só o custo e a melhor afectação de unidades tendo em consideração só as emissões determinam os pontos extremos da curva de Pareto indicada na Figura 5.

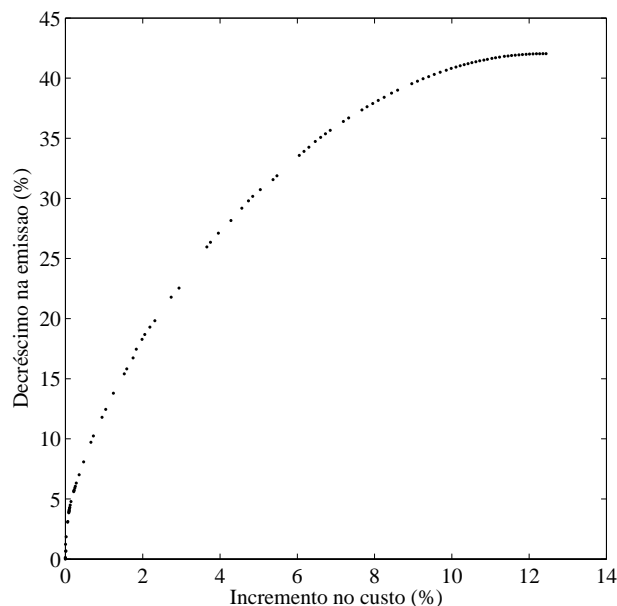


Fig. 5. Curva de Pareto.

Na Figura 5, a curva de Pareto foi obtida com 100 soluções não-dominadas e um factor de escala para a função objectivo que determina o nível de emissão aproximadamente igual ao preço proveniente do preço da tonelada de CO₂ no mercado do carbono. A curva de Pareto fornece o decréscimo nas emissões em função do incremento no custo. Esta curva apresenta um acentuado declive no início — um significativo decréscimo nas emissões, cerca de 16.5%, é obtido com um reduzido incremento no custo, cerca de 2.0%. Note-se que no final da curva sucede o oposto — para o mesmo incremento de 2.0% no custo apenas se consegue um decréscimo nas emissões de 0.9%. Em termos globais, podemos obter um significativo decréscimo nas emissões, cerca de 42.0%, com um moderado incremento no custo, cerca de 12.4%.

A curva de Pareto permite que o gestor possa suportar com racionalidade as suas decisões de acordo com o mercado de emissões.

A implementação da metodologia de otimização multiobjectivo para a afectação de unidades térmicas revelou-se eficiente e de computação rápida. O tempo de processamento em computador para a obtenção da curva de Pareto foi de 270s, com um tempo médio de processamento para cada uma das soluções de Pareto de 2.7s.

4. Conclusão

Neste trabalho é apresentado um sistema de informação para o suporte da decisão do planeamento da afectação de unidades térmicas em ambiente de mercado de emissões. O sistema de informação é descrito por um modelo que tem em conta o conflito entre os objectivos considerados, que são a minimização do custo de combustível e a minimização do nível de emissão poluente. Os objectivos considerados têm que satisfazer um compromisso. O método utilizado para obter este compromisso foi um método de otimização multiobjectivo misto, método da soma ponderada das funções objectivo com o método das ε -restrições. O gestor pode escolher uma solução associada à curva de Pareto de acordo com o mercado de emissões. Os resultados mostram que a metodologia proposta é eficiente para obter o planeamento da afectação de unidades utilizando a curva de Pareto, sendo o tempo de computação reduzido.

Referências

- [1] M. Muslu, "Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates", *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, No. 2, pp 153-158, Outubro de 2004.
- [2] M.A. Abido, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 18, No. 4, pp 1529-1537, Novembro de 2003.
- [3] C. Huang e Y. Huang, "A novel approach to real-time economic emission power dispatch", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp 288-294, Fevereiro de 2003.
- [4] J.S. Dhillon e D. P. Kothari, "The surrogate worth trade-off approach for multiobjective thermal power dispatch problem", *Electric Power Systems Research*, Vol. 56, No. 2, pp 103-110, Novembro de 2000.
- [5] V.M.F. Mendes, S.J.P.S. Mariano, J.P.S. Catalão e L.A.F.M. Ferreira, "Emission constraints on short-term schedule of thermal units", in *Proc. UPEC2004*, Vol. 3, pp. 1068-1072.
- [6] T. Gjengedal, "Emission constrained unit-commitment (ECUC)", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 11, No. 1, pp 132-138, Março de 1996.
- [7] L.A.F.M. Ferreira, T. Anderson, C.F. Imparato, T.E. Miller, C.K. Pang, A.Svoboda e A.F. Vojdani, "Short-term resource scheduling in multi-area hydrothermal power systems", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 11, No. 3, pp 200-212, Julho de 1989.
- [8] A.I. Cohen e V.R. Sherkat, "Optimization-based methods for operations scheduling", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No. 12, pp 1574-1591, Dezembro de 1987.
- [9] V.M.F. Mendes, L.A.F.M. Ferreira, P. Roldão e R. Pestana, "Optimal short-term scheduling in large hydrothermal power systems", in *Proc. PSCC1993*, Vol. 2, pp. 1297-1303.