

# Nova Metodologia Baseada em Optimização Multiobjectivo para a Exploração de Recursos Térmicos

J.P.S. Catalão\*, S.J.P.S. Mariano\*, V.M.F. Mendes\*\* e L.A.F.M. Ferreira\*\*\*

\* Departamento de Engenharia Electromecânica

Universidade da Beira Interior

Calçada Fonte do Lameiro – Covilhã

Telf: +351 275 329 759; fax: +351 275 329 972; e-mail: [catalao@ubi.pt](mailto:catalao@ubi.pt), [sm@ubi.pt](mailto:sm@ubi.pt)

\*\* Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Rua Conselheiro Emídio Navarro – Lisboa

Telf: +351 218 317 038; fax: +351 218 317 009; e-mail: [vfmendes@isel.pt](mailto:vfmendes@isel.pt)

\*\*\* Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Instituto Superior Técnico

Avenida Rovisco Pais – Lisboa

Telf: +351 218 417 700; fax: +351 218 417 421; e-mail: [lmf@ist.utl.pt](mailto:lmf@ist.utl.pt)

**Resumo** — Nesta comunicação é enunciado e descrito o problema de optimização da exploração de recursos térmicos. Uma nova metodologia baseada em optimização multiobjectivo é proposta para a resolução deste problema tendo em consideração a restrição de emissões. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos para um caso de estudo e conclui-se sobre o desempenho da nova metodologia proposta.

## 1. Introdução

Um sistema de produção de energia eléctrica é um sistema complexo e de grande dimensão. O objectivo tradicional deste sistema consiste em satisfazer a procura de energia eléctrica de forma racional, permitindo o bom aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis para a produção de energia eléctrica. Para satisfazer a procura de energia eléctrica dispõe-se tipicamente de dois tipos de recursos energéticos, para além da produção em regime especial: recursos hídricos e recursos térmicos [1].

Na sua grande maioria, os melhores aproveitamentos hidroeléctricos com viabilidade de exploração, em termos de potência instalada, já se encontram instalados na generalidade dos países desenvolvidos. Este facto tem sido uma das razões que levou a que a cobertura do aumento da procura de energia eléctrica tenha sido realizada, em escala considerável, pela construção de centrais térmicas.

As centrais térmicas podem ser instaladas estrategicamente em zonas bem localizadas relativamente à posição dos centros de consumo, apresentando, dentro das suas capacidades, uma continuidade de serviço em produção que não necessita de ser condicionada como no caso das centrais hídricas, exceptuando as que têm restrições na quantidade de combustível disponível durante o horizonte temporal.

Contudo, em contraste com as centrais hídricas, as centrais térmicas podem prejudicar acentuadamente o ambiente pela emissão de Gases com Efeito de Estufa (GEE). Estes prejuízos sobre o ambiente são visíveis tanto a nível local como a nível global: disto é exemplo o efeito de estufa atribuído às emissões poluentes para a atmosfera que a queima de combustíveis fósseis pode ocasionar [2].

Contrariamente à produção hidroeléctrica, existe um custo de operação associado à produção termoeléctrica devido ao custo de combustível na conversão energética. Ainda, para a produção termoeléctrica existe a necessidade de tomar decisões de natureza discreta, de afectar ou não uma unidade, existindo um custo de arranque que depende, no caso das unidades com turbinas a vapor, do tempo de paragem anterior e do facto de se manterem ou não as caldeiras em actividade durante esse tempo de paragem. Quanto maior é o tempo de paragem, maiores são as perdas energéticas no conjunto caldeira-turbina.

A integração da vertente ambiental na política energética, em particular no sector eléctrico, é revestida de importância relevante na actualidade. A energia eléctrica em si é uma energia limpa, no entanto tem associado à sua produção impactes ambientais. As preocupações ambientais que se manifestaram a nível político desde 1972, na primeira Cimeira da Terra realizada em Estocolmo, Suécia, conduziram a estâncias internacionais de debate sobre o meio ambiente no sentido da sua preservação. Assim, em 1997 foi estabelecido o Protocolo de Quioto que formaliza o compromisso dos países industrializados na redução das emissões de GEE.

O Protocolo de Quioto estabelece que as emissões para os países considerados desenvolvidos devem ser reduzidas em 5%, de 2008 a 2012, comparativamente às emissões em 1990, ano de referência.

Assim, a consideração de novas restrições de âmbito ambiental, em conjunto com as preocupações de cariz económico, é numa necessidade premente para as empresas produtoras de energia eléctrica na exploração dos recursos térmicos disponíveis.

A restrição de emissões tem sido considerada principalmente no problema de despacho económico, onde existe um número considerável de referências bibliográficas recentes [3-5].

Para o problema de afectação de unidades as referências respeitantes à consideração da restrição de emissões são em número menos significativo e menos recentes [6, 7]. Contudo, se não é considerada a restrição de emissões no problema de afectação de unidades, uma unidade de custo reduzido, mas excessivamente poluente, pode ser privilegiada na afectação.

Nesta comunicação é enunciado e descrito o problema de optimização da exploração de recursos térmicos. Uma nova metodologia baseada em optimização multiobjectivo é proposta para a resolução deste problema tendo em consideração a restrição de emissões. Apresentam-se os resultados numéricos obtidos para um caso de estudo e conclui-se sobre o desempenho da nova metodologia proposta.

## 2. Formulação do Problema

O problema de optimização da exploração de recursos térmicos corresponde nesta comunicação a um problema de optimização multiobjectivo. As funções objectivo a serem minimizadas simultaneamente são dadas por:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I C_{ik}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \quad (1)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I E_{ik}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \quad (2)$$

A função objectivo em (1) é o custo total de operação, i.e., custo de operação para todos os recursos em todas as horas do horizonte temporal.

A função de custo  $C_{ik}$  considerada corresponde ao custo de combustível associado: à quantidade de energia eléctrica obtida na conversão energética  $C_{ik}^{\text{op}}$ ; ao gasto de combustível no arranque  $C_{ik}^{\text{arr}}$ .

O custo de combustível na conversão energética pode ser aproximado por um desenvolvimento em série de Taylor até à segunda ordem:

$$C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, u_{ik}) = (\alpha_i + \beta_i p_{ik} + \gamma_i p_{ik}^2) u_{ik} \quad (3)$$

em que  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  são os parâmetros que determinam o custo de combustível na conversão energética para a unidade  $i$ .

A função objectivo em (2) é a emissão total na operação, i.e., a emissão proveniente da operação de todos os recursos em todas as horas do horizonte temporal.

A função de emissão  $E_{ik}$  considerada é determinada: pela emissão na conversão energética  $E_{ik}^{\text{op}}$ ; pela emissão durante o arranque  $E_{ik}^{\text{arr}}$ . A emissão durante o arranque é função do gasto de combustível nesse arranque.

A emissão na conversão energética pode também ser aproximada por um desenvolvimento em série de Taylor até à segunda ordem:

$$E_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, u_{ik}) = (a_i + b_i p_{ik} + c_i p_{ik}^2) u_{ik} \quad (4)$$

em que  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são os parâmetros que determinam a emissão na conversão energética para a unidade  $i$ .

O problema de optimização da exploração de recursos térmicos é sujeito a restrições do tipo global e restrições do tipo local, que definem o conjunto das decisões admissíveis. A seguinte restrição descreve a satisfação da procura de energia eléctrica em cada hora  $k$ , sem consideração das perdas por efeito de Joule nas linhas de transporte de energia eléctrica:

$$\sum_{i=1}^I p_{ik} = D_k \quad (5)$$

## 3. Problema de Optimização Multiobjectivo

O problema que consiste em otimizar simultaneamente um conjunto não singular de funções objectivo é denominado de problema de optimização multiobjectivo [8].

O problema de optimização multiobjectivo considerado nesta comunicação é formulado por:

$$\text{Min } \{f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}), g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})\} \quad (6)$$

sujeito a:

$$(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \in \mathcal{F} \quad (7)$$

As funções objectivo consideradas são de natureza conflituosa, visto que, podem existir soluções admissíveis que não minimizem simultaneamente as funções objectivo, sendo contudo possível identificar soluções que definem compromissos entre as funções objectivo — soluções não dominadas, não inferiores ou óptimas-Pareto.

Uma das metodologias utilizadas para a obtenção das soluções não dominadas recorre à soma ponderada das funções objectivo, dada por:

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = w f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) + (1-w) \xi g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \quad (8)$$

em que  $\xi$  é o factor de escala para as emissões, em unidade económica por unidade de emissão, e  $w$  é o factor de ponderação que determina a combinação convexa em (8), cujo valor tem que satisfazer a relação  $0 \leq w \leq 1$  de acordo com a metodologia da soma ponderada das funções objectivo.

A curva determinada pelas soluções não dominadas é denominada de curva de compromisso, ou curva de Pareto.

Seja definido o parâmetro — taxa de variação  $\zeta$  — para cada solução não dominada  $o$ , relativamente à solução não dominada anterior  $o-1$ , dado por:

$$\zeta^o = \frac{g_{\%}(\mathbf{x}^o, \mathbf{p}^o, \mathbf{u}^o) - g_{\%}(\mathbf{x}^{o-1}, \mathbf{p}^{o-1}, \mathbf{u}^{o-1})}{f_{\%}(\mathbf{x}^o, \mathbf{p}^o, \mathbf{u}^o) - f_{\%}(\mathbf{x}^{o-1}, \mathbf{p}^{o-1}, \mathbf{u}^{o-1})} \times \frac{f_{\%}^{\max}}{g_{\%}^{\max}} \quad (9)$$

que determina a variação do decréscimo percentual na emissão total com o incremento percentual no custo total, comparativamente à variação máxima.

A esta taxa de variação corresponde um ângulo de declive  $\theta$ , dado por:

$$\theta^o = \tan^{-1}(\zeta^o) \quad (10)$$

O novo parâmetro, taxa de variação, e o correspondente ângulo de declive possibilitam a escolha apropriada da melhor solução de compromisso entre a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima.

#### 4. Caso de Estudo

O caso de estudo é constituído por um sistema termoelectrico com onze unidades, descrito na Tabela I, sendo o horizonte temporal de 168 horas.

TABELA I  
PARÂMETROS DAS UNIDADES, CUSTOS DE ARRANQUE E  
RESTRIÇÕES DE POTÊNCIA

$i$	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$C_i^{\text{arr}}$	$p_i^{\text{min}}$	$p_i^{\text{max}}$
1	1675	18.78	0.013	25.80	-0.52	0.007	3350	60	300
2	1207	18.96	0.018	26.90	-0.54	0.007	2415	60	300
3	2277	19.71	0.010	30.10	-0.49	0.004	4553	50	500
4	2292	20.84	0.010	25.30	-0.56	0.004	4584	50	500
5	2239	21.02	0.009	30.10	-0.39	0.004	4479	50	460
6	2516	19.78	0.012	25.30	-0.53	0.004	5032	50	500
7	1895	20.86	0.019	23.90	-0.40	0.008	3789	20	215
8	1860	22.00	0.015	23.90	-0.40	0.008	3720	20	210
9	1410	20.39	0.049	31.60	-0.63	0.004	2821	20	250
10	1270	17.92	0.077	34.30	-0.68	0.004	2539	20	250
11	1469	19.71	0.077	22.90	-0.64	0.005	2937	20	210

O perfil da procura de energia eléctrica é apresentado na Fig.1.

A nova metodologia proposta foi implementada num computador com processador a 1.6-GHz e 512 MB de RAM, usando linguagem Fortran. Inicialmente, a afectação de unidades é realizada considerando para função objectivo só o custo total ou só a emissão total, i.e., são realizadas duas optimizações para se determinarem as soluções extremas da curva de Pareto: solução correspondente ao custo total mínimo; solução correspondente à emissão total mínima. Posteriormente, o custo total e a emissão total são considerados simultaneamente através da metodologia da soma ponderada das funções objectivo apresentada anteriormente.

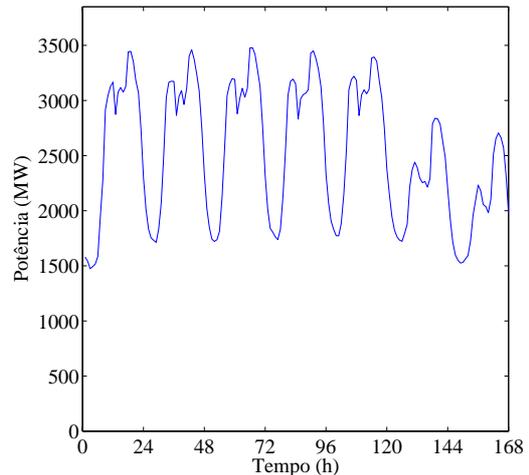


Fig. 1. Perfil da procura de energia eléctrica

A produção horária total para as unidades 1 a 6 e para as unidades 7 a 11 é apresentada, respectivamente, na Fig.2 e na Fig.3. As linhas a traço contínuo e as linhas a traço interrompido representam, respectivamente, a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima.

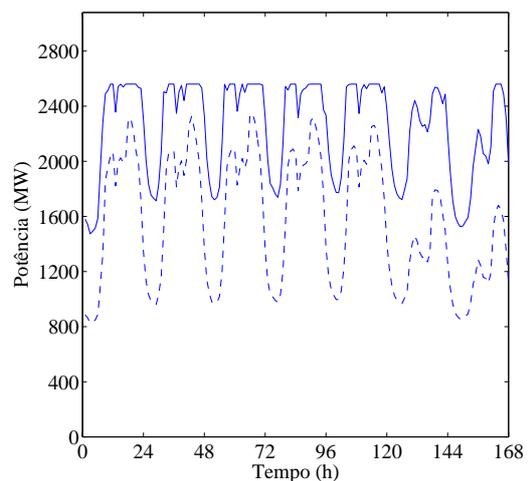


Fig. 2. Produção horária total para as unidades 1 a 6

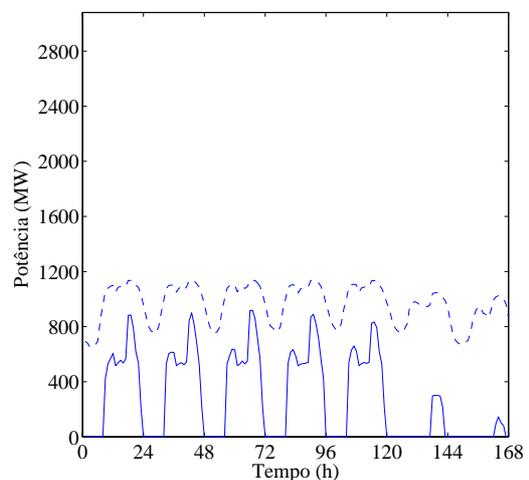


Fig. 3. Produção horária total para as unidades 7 a 11

Neste caso de estudo, as unidades 1 a 6 têm custos mais favoráveis, mas são menos favoráveis relativamente às emissões, comparando com as unidades 7 a 11. Assim, na Figura 2 a potência horária total é mais elevada na solução correspondente ao custo total mínimo, enquanto que na Figura 3 a potência horária total é mais elevada na solução correspondente à emissão total mínima.

Na Fig.4 e na Fig.5 são apresentadas as soluções não dominadas da curva de Pareto para o factor de escala  $\xi = \{7, 28\}$ . Este factor de escala pode corresponder ao preço da licença de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo este preço fornecido pelo mercado de emissões.

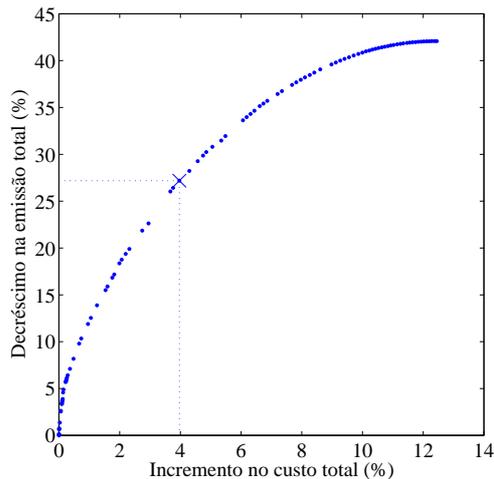


Fig. 4. Soluções não dominadas da curva de Pareto para  $\xi = 7$

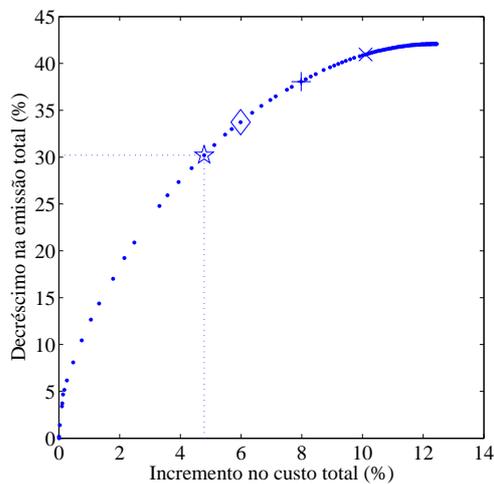


Fig. 5. Soluções não dominadas da curva de Pareto para  $\xi = 28$

A curva de Pareto representa um compromisso entre o custo total e a emissão total. Cada uma das 101 soluções não dominadas, apresentadas em consequência da variação do factor de ponderação  $w$  entre 0 e 1 com incrementos de 0.01, corresponde a uma afectação de unidades para o horizonte temporal de 168 horas.

Na Tabela II são apresentados os resultados comparativos para a afectação de unidades.

TABELA II  
RESULTADOS COMPARATIVOS PARA A AFECTAÇÃO DE UNIDADES

Afectação de unidades	Factor de escala	Custo total (k\$)	Energia total (GWh)	Emissão total (Gg)
Custo total mínimo	-	12994	426	601
Emissão total mínima	-	14612	426	348
Melhor solução de compromisso	7	13510	426	438
	28	13589	426	424

Ainda, o tempo de computação requerido pela nova metodologia proposta é de 270s, correspondendo em média a 2.67s para cada solução não dominada.

## 5. Conclusões

A resolução do problema de optimização da exploração de recursos térmicos foi obtida através de uma nova metodologia baseada em optimização multiobjectivo, que tem em consideração simultaneamente o objectivo económico e o objectivo ambiental. A melhor solução de compromisso, entre a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima, foi determinada em consequência do novo parâmetro apresentado, taxa de variação, e do correspondente ângulo de declive. Os resultados numéricos confirmam o bom desempenho da nova metodologia proposta, visto que, fornece a curva de Pareto e a melhor solução de compromisso, do conjunto de soluções não dominadas, com um tempo de computação reduzido.

## Referências

- [1] J.P.S. Catalão, *Novas Metodologias de Optimização em Sistemas de Energia Hidrotérmicos*, Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Dezembro 2006.
- [2] G.M. Bellhouse e H.W. Whittington, "Simulation of gaseous emissions from electricity generating plant," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 18, No. 8, pp. 501-507, November 1996.
- [3] M.A. Abido, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 4, pp. 1529-1537, November 2003.
- [4] M. Muslu, "Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 71, No. 2, pp. 153-158, October 2004.
- [5] C.-L. Chiang, J.-H. Liaw, e C.-T. Su, "New approach with a genetic algorithm framework to multi-objective generation dispatch problems," *Eur. Trans. Electr. Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 381-395, July-August 2005.
- [6] S. Kuloor, G.S. Hope, e O.P. Malik, "Environmentally constrained unit commitment," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 139, No. 2, pp. 122-128, March 1992.
- [7] T. Gjengedal, "Emission constrained unit-commitment (ECUC)," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 11, No. 1, pp. 132-138, March 1996.
- [8] K.M. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic, Norwell, USA, 1999.