Sistema de suporte para tomada de decisão: despacho económico em ambiente de mercado de carbono

V.M.F. Mendes(1), J.P.S. Catalão(2), S.J.P.S. Mariano(3) e L.A.F.M. Ferreira(4)
ISEL(1)-UBI(2, 3)-IST(4)
ISEL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1950-062 Lisboa
Telefone: +351.218.317.038, Fax: +351.218.317.009
UBI, Universidade da Beira Interior
R. Fonte do Lameiro, 6201-001 Covilhã
IST, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

Resumo

Nesta comunicação é apresentada uma contribuição para a criação de uma aplicação para um sistema de informação de tomada de decisão de despacho económico na operação de grupos térmicos em sistemas de energia eléctrica, considerando a emissão poluente em ambiente de mercado de carbono; é formulado o despacho económico com consideração da emissão poluente como um problema de programação matemática multiobjectivo (biobjectivo), sendo as funções objectivo convexas e continuamente diferenciáveis; é estudada a identificação do óptimo de Pareto recorrendo às condições de Karush-Kuhn-Tucker; é apresentado e discutido um caso de estudo.

Palavras Chave: Sistema de informação, mercado do carbono, despacho económico, optimização multiobjectivo.

Introdução

Tradicionalmente, em sistemas de energia eléctrica, a emissão poluente não foi objecto de tratamento nas fases de longo, médio e curto prazo para o planeamento da operação do sistema, visto que, o seu custo foi externalizado. Assim, as aplicações computacionais para o planeamento de curto prazo [1] ignoram a emissão poluente na afectação dos grupos térmicos, que vão entrar em despacho económico, sendo o despacho económico tradicional descrito como um problema de programação matemática que consiste em minimizar só o custo do combustível sujeito à satisfação da procura de energia eléctrica e aos limites técnicos de operação dos grupos. Consequentemente, o despacho económico tradicional é caracterizado por uma única função objectivo e consiste só em fazer a atribuição económica mais racional de potência eléctrica para a operação dos grupos.

Com o Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005, a internalização do custo proveniente da emissão poluente no planeamento da operação do sistema tem que ser realizada [2-3]. É geralmente verificável que o custo dos combustíveis fósseis aumenta com a diminuição da emissão poluente, visto que, os combustíveis fósseis mais poluentes têm tipicamente preços inferiores. Consequentemente, a função que determina o custo de combustível e a função que determina o nível de emissão poluente para um parque de grupos térmicos tendem por isso a ser funções conflituosas. O problema de despacho económico tradicional tem que ser alterado para um problema de programação matemática multiobjectivo, sendo as funções objectivo para o problema o custo de combustível e o nível de emissão poluente total do parque de grupos.

Nesta comunicação é apresentada uma contribuição usando uma formulação de programação matemática multiobjectivo para a criação de uma aplicação informática para um sistema de informação de tomada de decisão de despacho económico na operação de grupos térmicos em sistemas de energia eléctrica, considerando a emissão poluente em ambiente de mercado de carbono; é formulado e estudado o problema de despacho económico com consideração da emissão poluente, recorrendo às condições de Karush-Kuhn-Tucker para a identificação do óptimo; é apresentado e discutido um caso de estudo, determinando a curva de compromisso entre os objectivos conflituosos, custo de combustível e nível de emissão poluente. Esta curva no espaço dos objectivos dita de curva de Pareto permite obter soluções não dominadas, correspondendo a soluções eficientes no espaço das variáveis de decisão, suportando com racionalidade a consideração do mercado do carbono.

Formalização

O despacho económico para a operação de grupos térmicos, considerando o custo do combustível e a emissão poluente, é descrito por um problema de programação matemática multiobjectivo que consiste em minimizar as funções objectivo, função que determina o custo de combustível e a função que determina o nível de emissão poluente, sujeito à satisfação da procura de energia eléctrica e aos limites técnicos de operação dos grupos. Considere um parque de grupos térmicos com I grupos. Sejam C(p) a função que determina o custo total de combustível usado e E(p) a função que determina o nível total de emissão poluente no parque de grupos quando os grupos entregam as potências indicadas pelas coordenadas do vector p. Sucintamente, o problema é escrito como

$$\begin{aligned} &\min \{C(p), E(p)\} \\ &\quad \text{s.a} \\ &\qquad p \in F \qquad\qquad p = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_I) \end{aligned} \tag{1}$$

sendo: p o vector cujas coordenadas são as decisões de nível de potência para os grupos e F o conjunto dos vectores p admissíveis, conjunto das decisões de potências admissíveis.

Considere a seguinte convenção de escrita no que se segue: X é substituído por C, E e G respectivamente para o custo operativo, para o nível de emissão poluente e para a função objectivo do problema ponderado, indicado mais à frente. O custo operativo, o nível de emissão poluente e a função objectivo do problema ponderado são a soma das contribuições dos grupos, pelo que

$$X(p) = \sum_i X_i(p_i)\,. \tag{2}$$

Para as funções que determinam os custos operativos e os níveis de emissão poluente dos grupos será admitido que são bem aproximados por um desenvolvimento em série de Taylor até à segunda ordem

$$X_i(p_i) = \alpha_i^x + \beta_i^x\, p_i + \frac{\gamma_i^x\, p_i^2}{2} \qquad\qquad i = 1, 2, \dots, I \tag{3}$$

sendo $\alpha_i^x, \beta_i^x \in \Re$ e $\gamma_i^x \in \Re^+ \cup \{0\}$.

Portanto, as funções que determinam os custos operativos e os níveis de emissão poluente dos grupos são funções convexas continuamente diferenciáveis. O custo incremental e a emissão incremental do grupo i são determinados por

$$IX_i(p_i) = \beta_i^x + \gamma_i^x p_i \qquad i = 1, 2, \ldots, I \qquad (4)$$

sendo o nível de potência eléctrica para a melhor eficiência do grupo, correspondente ao menor custo e o correspondente à menor emissão por unidade de potência eléctrica, determinado por

$$p_i^{ef\,x} = \operatorname*{proj}_{[\underline{p}_i,\, \overline{p}_i]} \sqrt{2\alpha_i^x / \gamma_i^x} \qquad i = 1, 2, \ldots, I. \qquad (5)$$

Se $p_i^{ef\,x} = \sqrt{2\alpha_i^x / \gamma_i^x}$, o menor custo ou a menor emissão por unidade de potência é determinado por

$$\lambda_i^{ef\,x} = \beta_i^x + \sqrt{2\alpha_i^x \gamma_i^x} \qquad i = 1, 2, \ldots, I. \qquad (6)$$

O conjunto F dos vectores p admissíveis em (1) será definido pela restrição global, satisfação da potência eléctrica D determinada pela procura de energia eléctrica, escrita como

$$D - \sum_i p_i = 0 \text{ , i. e., tem-se } \sum_i p_i = D \qquad (7)$$

e por restrições locais, limites técnicos de operação dos grupos, que são desigualdades do tipo

$$\underline{p}_i - p_i \le 0 \text{ e } p_i - \overline{p}_i \le 0 \text{, i. e., tem-se } \underline{p}_i \le p_i \le \overline{p}_i \quad i = 1, 2, \ldots, I. \quad (8)$$

As variáveis de decisão do problema em (1) são variáveis não discretas, visto que, no despacho económico não são feitas decisões sobre a entrada de grupos em funcionamento ou a sua saída de funcionamento. Normalmente, os grupos em operação apresentam um intervalo continuo de valores de potência admissível entre um mínimo não necessariamente nulo e um valor máximo; caso, para um grupo o intervalo seja singular, então a potência eléctrica está decidida nesse grupo, sendo o despacho feito com os restantes, satisfazendo a potência eléctrica D menos a potência eléctrica desse grupo.

Problema ponderado

As funções objectivo do problema (1) são funções convexas e o conjunto dos vectores das potências admissíveis é um conjunto convexo. Consequentemente, o problema (1) é um problema convexo. Nesta comunicação, para gerar as soluções óptimas de Pareto de (1), foi usada a metodologia da soma ponderada das funções objectivo. O problema (1) é modificado para o seguinte problema ponderado

$$\begin{aligned} &\min \; (1-w)\, C(p) + w\,\lambda\, E(p) \\ &\quad \text{s.a} \\ &\qquad p \in F \qquad \text{com } 0 \le w \le 1 \end{aligned} \qquad (9)$$

$\lambda > 0$ é um parâmetro que pode, por exemplo, corresponder a um factor conversão de unidades. Seja $G(p; w, \lambda) = (1-w)\, C(p) + w\,\lambda\, E(p)$ a função objectivo de (9). A metodologia da soma ponderada das funções objectivo permite obter os pontos extremos eficientes [4] para o problema (1), pontos não dominados no espaço dos critérios definidos pelas duas funções objectivo, quando w toma os valores no intervalo $0 \le w \le 1$. Os pontos extremos eficientes determinam a curva de Pareto, que permite um suporte à tomada de decisão de despacho económico em ambiente de mercado de carbono. A função objectivo do problema (9) pode ser interpretada como representando a menos de uma constante multiplicativa o custo total operativo internalizando o custo do nível de emissão poluente: seja $\pi \ge 0$ o custo por unidade de emissão poluente, então o custo total operativo será

$$C^t(p;\pi) = C(p) + \pi\lambda\, E(p) \tag{10}$$

seja $w = \dfrac{\pi}{\pi+1}$, i. e., $\pi = \dfrac{w}{1-w}$ então tem-se

$$C^t(p;\pi) = \frac{1}{1-w} G(p; w, \lambda) \text{ com } 0 < w < 1 \tag{11}$$

logo o problema (9), a menos de uma constante multiplicativa da função objectivo, é um problema de minimização do custo total operativo, internalizando o custo da emissão poluente a preço π. Facilmente, concluiu-se que caso as expressões (10) e (11) sejam escritas para π', λ', w', então para que haja identificação dos problemas tem que verificar-se

$$G(p; w', \lambda') = \frac{\lambda'}{(1-w)\lambda' + w\lambda} G(p; w, \lambda) \text{ sendo } w' = \frac{w\lambda}{(1-w)\lambda' + w\lambda} \tag{12}$$

Pelo que na função objectivo do problema (9) λ pode ter um valor positivo qualquer, desde que se escolha por (12) o valor correspondente de w', não havendo alteração no ponto solução de (9). Assim, sendo será considerado que $\lambda = 1$ e será por simplificação escrito

$$G(p; w) = G(p; w, 1) = \sum_i \alpha_i^G(w) + \beta_i^G(w)\, p_i + \frac{\gamma_i^G(w)\, p_i^2}{2} \tag{13}$$

sendo $(\alpha_i^G(w), \beta_i^G(w), \gamma_i^G(w)) = (1-w)(\alpha_i^C, \beta_i^C, \gamma_i^C) + w(\alpha_i^E, \beta_i^E, \gamma_i^E)$.

Portanto, (9) é um problema convexo, com função objectivo continuamente diferenciável. Consequentemente, o teorema de Karush-Kuhn-Tucker é uma condição necessária e suficiente para a identificação do óptimo de (9), as condições de Karush-Kuhn-Tucker são escritas como

$$\text{K\_K\_T.1 } \sum_i p_i^* = D \quad \text{e } \underline{p}_i \le p_i^* \le \overline{p}_i \text{ para i = 1, 2, . . . , I}$$

$$\text{K\_K\_T.2 } \exists\, \underline{\lambda}_i, \overline{\lambda}_i \ge 0 \text{ tais que } \underline{\lambda}_i(\underline{p}_i - p_i^*) = 0 \text{ e } \overline{\lambda}_i(p_i^* - \overline{p}_i) = 0 \text{ para i = 1, 2, . . . , I}$$

$$\text{K\_K\_T.3 } \exists\, \lambda \in \Re \text{ tal que } IG_i(p_i^*; w) - \underline{\lambda}_i + \overline{\lambda}_i = \lambda \qquad \text{i = 1, 2, . . . , I.} \tag{14}$$

O formalismo deste despacho é idêntico ao do despacho tradicional, mas sendo a função objectivo a combinação convexa (13), que pode por (10) e (11) ser associada ao custo total operativo internalizando o custo do nível de emissão poluente.

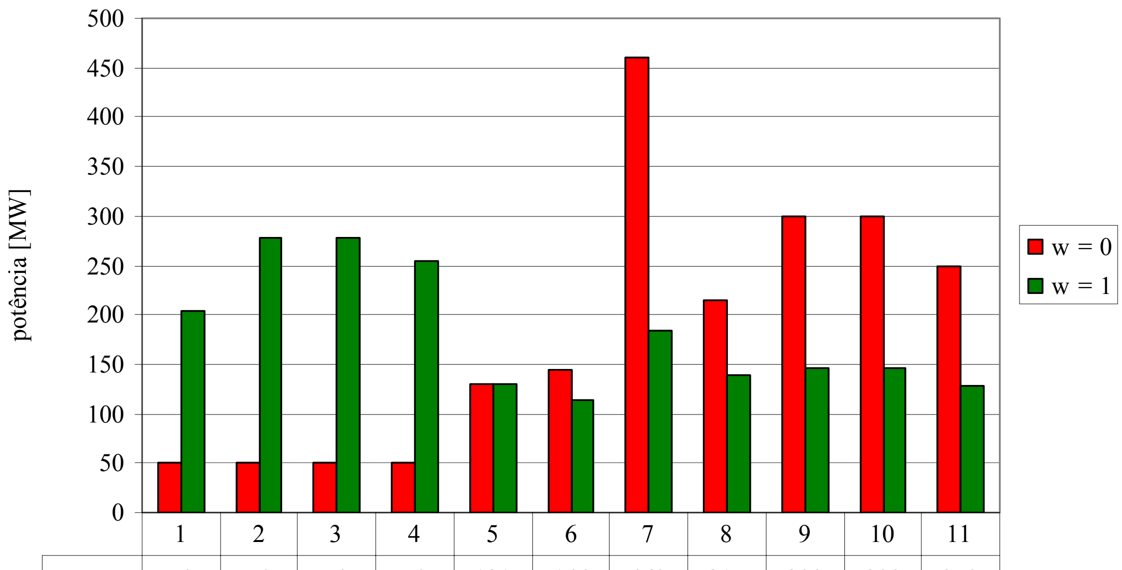
Caso de estudo

Considere onze grupos térmicos, satisfazendo uma carga com a potência eléctrica de 2000 MW. Os parâmetros que caracterizam as funções objectivo (3), os limites técnicos (8) e o mérito dos grupos (6) para o problema de despacho económico são os indicados na Tabela 1.

	Custo					Emissão			Eficiência			
Grupo	α	β	γ	(MW)	(MW)	a	b	c	p_{ef}^{C}	λ_{ef}^{C}	p_{ef}^{E}	λ_{ef}^{E}
1	2277	49.71	0.010	50	250	20.0	-0.01	0.005	250.0	60.07	89.4	0.44
2	2516	39.78	0.012	50	500	45.3	-0.10	0.004	500.0	47.81	150.5	0.50
3	2292	30.84	0.040	50	500	45.3	-0.10	0.004	338.5	44.38	150.5	0.50
4	1070	39.92	0.050	50	500	40.1	-0.01	0.004	206.9	50.26	141.6	0.56
5	1860	22.00	0.075	20	210	23.9	-0.03	0.008	210.0	38.73	77.3	0.59
6	1009	20.71	0.077	20	210	20.0	-0.01	0.009	161.9	33.18	66.7	0.59
7	2239	21.02	0.009	50	460	40.1	-0.10	0.006	460.0	27.96	115.6	0.59
8	1895	20.86	0.019	20	215	33.9	-0.10	0.008	215.0	31.72	92.1	0.64
9	1675	18.78	0.013	60	300	35.8	-0.01	0.007	300.0	26.31	101.1	0.70
10	1207	18.96	0.018	60	300	36.9	-0.02	0.007	300.0	25.68	102.7	0.70
11	1410	10.39	0.019	20	250	31.6	-0.01	0.008	250.0	18.41	88.9	0.70
			total	450	3695							

Tabela 1. Parâmetros que caracterizam os grupos.

Na Tabela 1, os grupos estão ordenados por ordem crescente da menor emissão λ_{ef}^{E} por unidade de potência. Na Figura 1, as potências dos grupos são indicadas para o despacho económico, w = 0, e para o despacho de emissão mínima, w = 1.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
w = 0	50	50	50	50	131	144	460	215	300	300	250
w = 1	204	277	277	255	130	113	185	139	146	147	127

Figura 1. Potências dos grupos em despacho: tradicional, w = 0, e de emissão mínima, w = 1.

O ponto ideal é (**66362**, **1331**), este ponto é determinado pelos mínimos individuais de cada uma das funções objectivo, i.e., a primeira coordenada é o menor custo, despacho económico tradicional, e a segunda a menor emissão possível para satisfazer a carga com a potência eléctrica de 2000 MW.

Para o despacho económico tradicional as potências dos grupos 7-11, mais económicos, estão no seu limite técnico máximo, enquanto as dos grupos anteriores são inferiores ao máximo ou estão no mínimo. Entre os dois despachos a diferença de custo é de 26.5% e a de emissão de -38.0%.

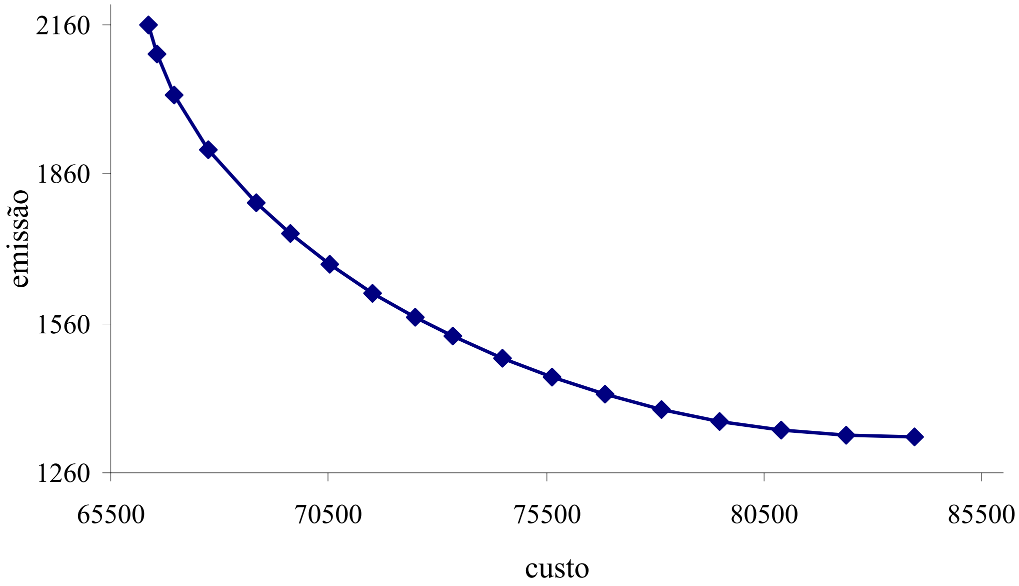


Figura 2. Curva frente de Pareto para o de despacho económico multiobjectivo.

Na Figura 2, a frente de Pareto permite suportar uma decisão racional, tendo em consideração o custo e a emissão: a emissão por unidade de potência varia entre de 1.08 para 0.67, cabendo ao decisor face ao mercado de emissão e direitos de emissão, escolher a acumulação de emissão mais conveniente.

Conclusões

Nesta comunicação uma aplicação para um sistema de informação de tomada de decisão de despacho económico na operação de grupos térmicos em sistemas de energia eléctrica, considerando a emissão poluente em ambiente de mercado de carbono, é apresentada. O despacho económico com consideração da emissão poluente é descrito por um problema de programação matemática multiobjectivo, sendo as funções objectivo convexas e continuamente diferenciáveis. A identificação das soluções óptimas de Pareto é estudada, recorrendo às condições de Karush-Kuhn-Tucker. Um caso de estudo é apresentado e discutido, mostrando a utilidade da aplicação.

Referências

[1] Mendes, V.M.F., Ferreira, L.A.F.M., Roldão, P. and Pestana R., Optimal Short-Term Scheduling in Large Hydrothermal Power Systems, Proceedings of the 11th Power Systems Computation Conference, 2 (1993), 1297-1303.

[2] Mendes, V.M.F., Mariano, S.J.P.S., Catalão, J.P.S. and Ferreira, L.A.F.M., Emission Constraints on Short-Term Schedule of Thermal Units, Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference, 3 (2004), 1068-1072.

[3] João Catalão, Sílvio Mariano, Victor Mendes, Luís Ferreira, “Unit Commitment with Environmental Considerations: A Practical Approach”, Proceedings of the 15th Power Systems Computation Conference (PSCC'05), Liège, Belgium, Aug. 22-26, 2005, Session 18, Paper 3.

[4] Miettinen, K.M., Nonlinear Multiobjective Optimization, volume 12 of International Series in Operations Research and Management Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.