

Optimização da Exploração de Recursos Térmicos considerando a Restrição de Emissões

João Catalão †
Sílvia Mariano †
Victor Mendes ‡
Luís Ferreira §

† Departamento de Engenharia Electromecânica
UBI – Universidade da Beira Interior
catalao@ubi.pt
sm@ubi.pt

‡ Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação
ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
vfmendes@isiel.pt

§ Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
IST – Instituto Superior Técnico
lmf@ist.utl.pt

Abstract

This paper focuses on the optimal scheduling of thermal power systems. A new methodology based on multiobjective optimisation is proposed for solving the problem considering emission constraints. The numerical results obtained for a case study illustrate the behaviour of the new methodology proposed.

Resumo

Neste artigo 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.

Keywords: Optimal scheduling, multiobjective optimisation, emission constraints

Title: Optimal scheduling of thermal power systems considering emission constraints.

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, para além da produção em regime especial, de dois tipos de recursos energéticos: recursos hídricos e recursos térmicos (Catalão, 2006).

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 centrais térmicas 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 (Bellhouse and Whittington, 1996).

Relativamente à produção hidroeléctrica, existe um custo de operação associado à produção termoeléctrica devido ao custo de combustível utilizado 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 por gasto de combustível no 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 1992 foi adoptada a Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, no decurso da segunda Cimeira da Terra realizada no Rio de Janeiro, Brasil, visando a limitação das emissões de GEE na atmosfera. Posteriormente, 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. Em concreto, a União Europeia e os seus Estados-membros em conjunto têm o compromisso de redução das emissões de GEE em 8%. Os objectivos de limitação das emissões foram estabelecidos para cada um dos Estados-membros de acordo com as suas especificidades, como por exemplo, o

desenvolvimento económico e os recursos energéticos disponíveis. Portugal tem como meta limitar o aumento das emissões de GEE em 27%, comparativamente aos valores de 1990, meta que actualmente já foi ultrapassada.

O Protocolo de Quioto entrou finalmente em vigor a 16 de Fevereiro de 2005, mais de sete anos após ter sido assinado. A ratificação do acordo pela Federação Russa pôs fim a um longo período de incerteza e cumpriu a última etapa burocrática para que o Protocolo de Quioto passasse finalmente à prática, apesar da recusa dos Estados Unidos da América em ratificá-lo. A entrada em vigor do Protocolo de Quioto obriga à observação de regras estritas para o sector eléctrico, promovendo uma crescente pressão no sentido da internalização dos custos provenientes das emissões de GEE que a queima de combustíveis fósseis pode ocasionar.

Assim, a consideração de novas restrições de âmbito ambiental, em conjunto com as preocupações de cariz económico, é uma 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 (Abido, 2003; Chen and Huang, 2004; Chiang et al., 2005; Dhillon and Kothari, 2000; Hota and Dash, 2004; Muslu, 2004). O problema de despacho económico visa determinar unicamente a produção de energia eléctrica atribuída a cada unidade em serviço. Este problema não decide sobre quais as unidades que devem entrar em produção e quando, i.e., afectadas.

O problema de afectação de unidades visa estabelecer um mapa de operações factível para cada unidade disponível num sistema de produção de energia eléctrica, durante o horizonte temporal considerado, de forma a satisfazer as restrições impostas pelo sistema. Este problema, numa hierarquia decrescente dos prazos, está localizado imediatamente depois do planeamento de médio prazo e antes do problema de despacho económico, pelo que também se denomina de pré-despacho.

Diversas metodologias têm sido propostas na procura da solução óptima para o problema de optimização da exploração de recursos térmicos, nomeadamente para o problema de afectação de unidades (Padhy, 2004). O problema pode ser tipicamente abordado fazendo uso de duas metodologias: programação dinâmica e relaxação Lagrangeana.

A programação dinâmica foi uma das primeiras metodologias utilizadas para a resolução do problema de afectação de unidades (Snyder et al., 1987). A utilização da programação dinâmica permite abordar problemas não convexos e não lineares, assegurando a obtenção da solução óptima. A desvantagem da utilização da programação dinâmica advém da necessidade de se proceder a uma discretização, sendo exigente em termos de capacidade de memória e tempo de computação. Esta desvantagem evolui de forma exponencial com a dimensão do problema, o que constitui a denominada maldição da dimensionalidade associada à programação dinâmica. A aplicação de heurísticas à programação dinâmica permite reduzir o tempo de computação, deixando contudo de assegurar a obtenção da solução óptima. Portanto, a utilização da programação dinâmica só é possível para sistemas termoeléctricos de reduzida dimensão.

Para sistemas termoeléctricos de dimensão considerável é usada a metodologia baseada na relaxação Lagrangeana (Ferreira et al., 1989). A vantagem mais relevante que resulta da utilização desta metodologia reside na decomposição do problema em subproblemas. Assim, a afectação de unidades é obtida pela resolução dos subproblemas associados a cada uma das unidades, sendo as unidades optimizadas individualmente. O termo relaxação está relacionado com o princípio básico da metodologia baseada na

relaxação Lagrangeana, que consiste em ignorar as restrições do tipo global e penalizar a sua violação na função objectivo de forma linear recorrendo a multiplicadores, denominados de multiplicadores de Lagrange. A metodologia baseada na relaxação Lagrangeana não apresenta a desvantagem da maldição da dimensionalidade típica da programação dinâmica, visto que, as exigências em termos de capacidade de memória e tempo de computação evoluem em proporcionalidade directa com a dimensão do problema.

Para o problema de afectação de unidades as referências respeitantes à consideração da restrição de emissões são em número menos significativo e menos recentes (Abdul-Rahman et al., 1996; Gjengedal, 1996; Kuloor et al., 1992). 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.

A União Europeia, como forma de garantir o cumprimento dos compromissos assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto, aprovou a Directiva 2003/87/CE de 13 de Outubro de 2003 que cria o mecanismo de Comércio Europeu de Licenças de Emissão. A criação deste mecanismo, que estabelece um tecto de emissões de GEE para um conjunto de sectores industriais e instalações dependendo do tipo de actividade e da sua dimensão, renovou o interesse na consideração da restrição de emissões no problema de afectação de unidades (Catalão et al., 2005; Mendes et al., 2004).

Neste artigo 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

A notação usada neste artigo para a formulação do problema é apresentada seguidamente:

- k — índice da hora;
- i — índice do recurso;
- m — índice do tipo de reserva;
- n — índice da restrição cumulativa;
- K — número total de horas;
- I — número total de recursos;
- M — número do tipo de reservas consideradas;
- N — número de restrições cumulativas;
- x_{ik} — variável de estado para o recurso i na hora k ;
- p_{ik} — variável correspondente à potência entregue pelo recurso i na hora k ;
- u_{ik} — variável de controlo ou de decisão para o recurso i na hora k ;
- D_k — potência determinada pela procura de energia eléctrica na hora k ;
- R_{mk}^{req} — limite inferior da restrição de capacidade do sistema tipo- m na hora k ;
- H_n^{req} — limite superior da restrição cumulativa tipo- n ;
- X_i^0 — conjunto dos estados iniciais do recurso i ;
- X_i^K — conjunto dos estados finais do recurso i ;
- p_i^{min} — potência mínima entregue pelo recurso i em funcionamento;
- p_i^{max} — potência máxima entregue pelo recurso i em funcionamento;

- C_{ik} — função de custo associada com a afectação do recurso i na hora k ;
- R_{mi} — função que determina a contribuição do recurso i para a restrição de capacidade do sistema tipo- m ;
- H_{ni} — função que determina a contribuição do recurso i para a restrição cumulativa tipo- n ;
- A_{ik} — função de estado associada a cada recurso i na hora k ;
- P_{ik} — função de despacho associada a cada recurso i na hora k ;
- E_{ik} — função de emissão associada com a afectação do recurso i na hora k ;
- x — vector das variáveis de estado;
- p — vector das variáveis contínuas de decisão;
- u — vector das variáveis discretas de decisão;
- \mathcal{F}_{ik} — conjunto das decisões admissíveis para o recurso i na hora k ;
- \mathcal{H}_n — conjunto dos índices dos recursos com restrições cumulativas tipo- n ;
- \mathcal{U}_{ik} — conjunto das variáveis de controlo admissíveis para o recurso i na hora k ;
- \mathcal{P}_{ik} — conjunto das potências admissíveis para o recurso i na hora k ;
- O — conjunto de soluções não dominadas.

O problema de optimização da exploração de recursos térmicos visa estabelecer um mapa de operações factível para cada unidade disponível num sistema de produção de energia eléctrica, durante o horizonte temporal considerado, de forma a satisfazer as restrições impostas pelo sistema. A forma de resolução deste problema consiste na minimização do custo total de operação durante o horizonte temporal de uma semana, sendo o mapa de operações estabelecido com a periodicidade de uma hora.

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

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

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

A função objectivo em (1) é o custo total de operação, i.e., o custo de operação de todos os recursos durante todas as horas do horizonte temporal. O facto dos termos individualizados serem sempre não negativos implica que o custo total de operação é uma função separável e monótona não decrescente relativamente a cada um dos termos. Este facto garante as condições relativas às propriedades, necessárias e suficientes, que a função objectivo deve possuir para que se possa utilizar a programação dinâmica.

A função de custo C_{ik} considerada corresponde ao custo de combustível associado: à quantidade de energia eléctrica obtida na conversão energética C_{ik}^{op} ; ao gasto de combustível no arranque C_{ik}^{arr} . No caso das unidades com turbinas a vapor, o custo de arranque depende do tempo de paragem anterior e do facto de se manterem ou não as caldeiras em actividade durante esse tempo de paragem. No caso das unidades com turbinas a gás, o custo de arranque é considerado constante.

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

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

em que α_i , β_i e γ_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 durante todas as horas do horizonte temporal.

A função de emissão E_{ik} considerada é determinada: pela emissão na conversão energética E_{ik}^{op} ; pela emissão durante o arranque E_{ik}^{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:

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

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. As seguintes restrições descrevem as limitações de exploração associadas aos recursos:

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

$$\sum_{i=1}^I R_{mi}(x_{ik}, p_{ik}) \geq R_{mk}^{\text{req}} \quad m \in M \quad k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in \mathcal{H}_n} H_{ni}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \leq H_n^{\text{req}} \quad n \in N \quad (7)$$

em que:

$$(x_{ik}, p_{ik}) = A_{ik}(x_{i,k-1}, u_{ik}) \quad i \in I \quad k \in K \quad (8)$$

com:

$$x_{i0} \in X_i^0 \quad x_{iK} \in X_i^K \quad u_{ik} \in \mathcal{U}_{ik} \quad p_{ik} \in \mathcal{P}_{ik} \quad (9)$$

Em (5) é apresentada a restrição que descreve a satisfação da procura de energia eléctrica em cada hora k , que determina a potência D_k , sem consideração das perdas por efeito de Joule nas linhas de transporte de energia eléctrica. Esta restrição é do tipo global, visto que, todos os recursos podem ser envolvidos na sua satisfação.

Em (6) são apresentadas as restrições de capacidade do sistema em cada hora k . Estas restrições são do tipo global, visto que, existe por hipótese um determinado

conjunto de recursos envolvido na sua satisfação. A capacidade é definida como sendo a reserva mais a produção.

Em (7) são apresentadas as restrições cumulativas durante o horizonte temporal. Estas restrições são do tipo global, visto que, existe por hipótese um determinado conjunto de recursos envolvido na sua satisfação. Limitações nas quantidades de combustível disponíveis ou limitações nas emissões de GEE, relativamente a um conjunto de recursos durante o horizonte temporal, constituem exemplos de restrições cumulativas.

Em (8) são apresentadas as restrições operativas individualizadas para cada recurso, i.e., restrições do tipo local. A função A_{ik} é a função de estado associada a cada recurso i na hora k . Assim, o estado de cada recurso x_{ik} e a potência entregue p_{ik} são determinados pelo estado anterior $x_{i,k-1}$ e pela decisão u_{ik} . A função de despacho P_{ik} faz a correspondência que associa à variável de estado x_{ik} , e à variável de controlo u_{ik} , a variável p_{ik} em todo o seu domínio: $p_{ik} = P_{ik}(x_{ik}, u_{ik})$. A equação (8) pode apresentar dependência relativamente a cada hora, de forma a englobar o carácter dinâmico de alguns recursos.

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 (Miettinen, 1999).

O problema de optimização multiobjectivo considerado neste artigo é formulado por:

$$\text{Min } \{f(x, p, u), g(x, p, u)\} \tag{10}$$

sujeito a:

$$(x, p, u) \in F \tag{11}$$

As funções objectivo consideradas são de natureza conflitua, 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 dada solução admissível é não dominada se e só se não existe outra solução admissível que melhore simultaneamente todas as funções objectivo, i.e. a melhoria num objectivo só pode ser alcançada à custa da degradação do valor do outro objectivo (Pires et al., 2004).

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

$$h(x, p, u) = w f(x, p, u) + (1 - w) \xi g(x, p, u) \tag{12}$$

em que ξ 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 (12), 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.

Após a obtenção do conjunto de soluções não dominadas, graficamente ilustrado pela curva de Pareto, é determinada a variação do decréscimo percentual na emissão total com o incremento percentual no custo total, o que permite escolher uma solução de compromisso.

Cada solução não dominada, identificada pelo índice o , é caracterizada por um custo total e por uma emissão total. Esta solução pertence ao conjunto de soluções não dominadas O , e representa um mapa de operações factíveis, durante o horizonte temporal considerado. O incremento percentual no custo total para cada solução não dominada, relativamente ao custo total mínimo, é dado por:

$$f_{\%}(x^o, p^o, u^o) = \frac{f(x^o, p^o, u^o) - f^{\min}}{f^{\min}} \times 100\% \quad (13)$$

O decréscimo percentual na emissão total para cada solução não dominada, relativamente à emissão verificada para o custo total mínimo, é dado por:

$$g_{\%}(x^o, p^o, u^o) = \frac{g^{\max} - g(x^o, p^o, u^o)}{g^{\max}} \times 100\% \quad (14)$$

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

$$\zeta^o = \frac{g_{\%}(x^o, p^o, u^o) - g_{\%}(x^{o-1}, p^{o-1}, u^{o-1})}{f_{\%}(x^o, p^o, u^o) - f_{\%}(x^{o-1}, p^{o-1}, u^{o-1})} \times \frac{f_{\%}^{\max}}{g_{\%}^{\max}} \quad (15)$$

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 θ , dado por:

$$\theta^o = \tan^{-1}(\zeta^o) \quad (16)$$

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.

O ângulo de declive θ é uma função monótona crescente com o factor de ponderação w , que varia entre 0 e 1. Por um lado, se o ângulo de declive θ é reduzido, o decréscimo percentual na emissão total é inferior ao incremento percentual no custo total. Por outro lado, se o ângulo de declive θ é elevado, o decréscimo percentual na emissão total é superior ao incremento percentual no custo total.

4 Caso de Estudo

O caso de estudo é constituído por um sistema termoeléctrico com onze unidades, descrito na tabela 1, sendo o horizonte temporal de 168 horas. Este sistema termoeléctrico corresponde a um sistema real com dimensão apropriada a abordar o

problema primal de forma directa através da programação dinâmica, assegurando a obtenção da solução óptima.

Tabela 1: Parâmetros das unidades, custos de arranque e restrições de potência

Unidade i	α_i	β_i	γ_i	a_i	b_i	c_i	C_i^{arr}	p_i^{min}	p_i^{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 figura 1.

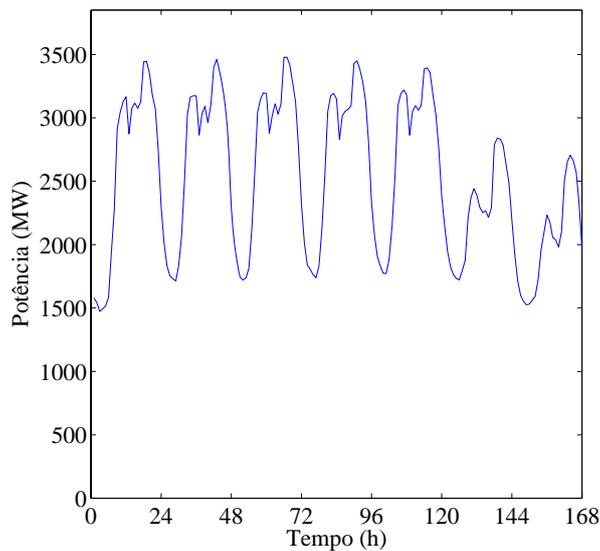


Figura 1: Perfil da procura de energia eléctrica

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.

A produção horária total para as unidades 1 a 6 e para as unidades 7 a 11 é apresentada, respectivamente, na figura 2 e na figura 3. 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.

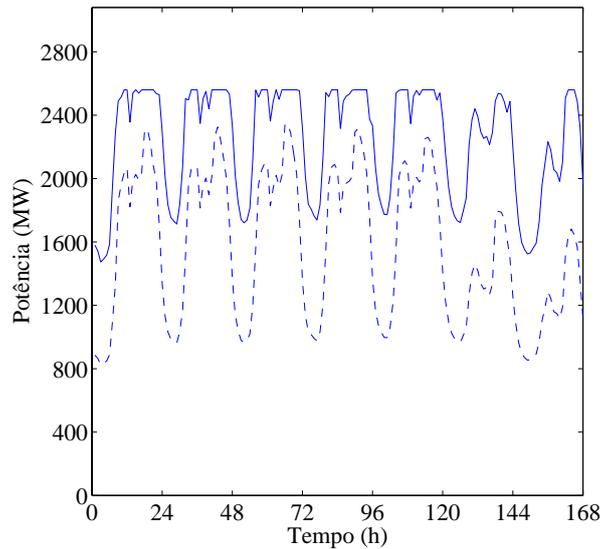


Figura 2: Produção horária total para as unidades 1 a 6; as linhas a traço contínuo e as linhas a traço interrompido representam, respectivamente, a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima

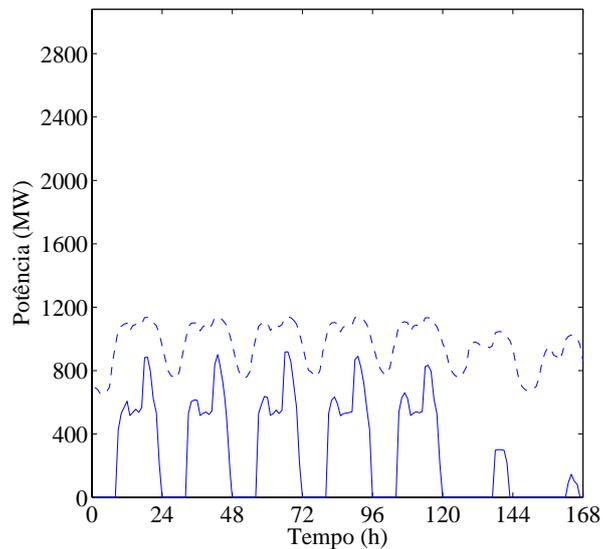


Figura 3: Produção horária total para as unidades 7 a 11; as linhas a traço contínuo e as linhas a traço interrompido representam, respectivamente, a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima

Na solução correspondente ao custo total mínimo, as unidades 1 a 6 são afectadas à potência máxima nas horas de ponta, visto que, apresentam menores custos. As unidades 7 a 11 não são afectadas nas horas de vazio, visto que, apresentam maiores custos. Assim, a afectação de unidades segue o perfil da procura de energia eléctrica. Contudo, se os custos de arranque forem aumentados pode existir uma maior tendência para não ligar as unidades e, uma vez ligadas, para não as desligar. A afectação de unidades para o custo total mínimo é apresentada na figura 4.

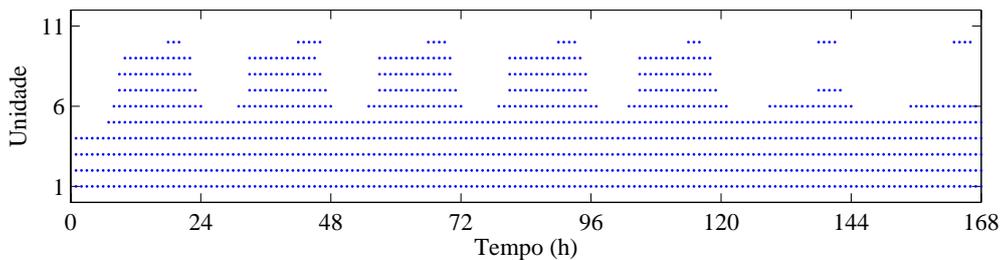


Figura 4: Afectação de unidades para o custo total mínimo; na figura é assinalada com ‘.’ a decisão de afectar a unidade à produção

Na solução correspondente à emissão total mínima, as unidades 1 a 6 são afectadas a potência inferior de forma a minimizar a emissão total, pelo que estas unidades operam em pontos de menor eficiência, sendo expectável um custo total superior. Assim, todas as unidades são afectadas de forma a satisfazer a procura de energia eléctrica. A afectação de unidades para a emissão total mínima é apresentada na figura 5.

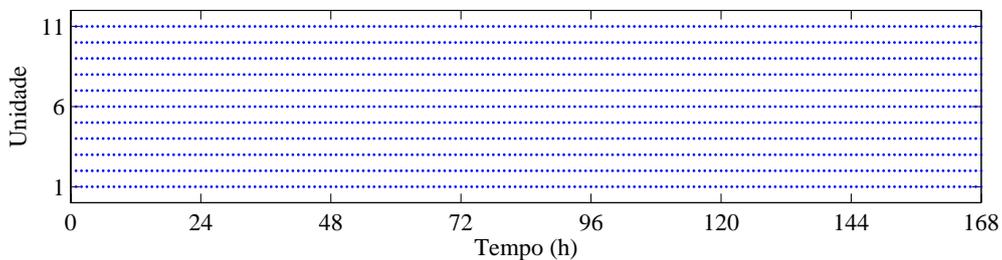


Figura 5: Afectação de unidades para a emissão total mínima; na figura é assinalada com ‘.’ a decisão de afectar a unidade à produção

Nas figuras 6 a 9 são apresentadas as soluções não dominadas da curva de Pareto para o factor de escala $\xi = \{7, 14, 21, 28\}$. Este factor de escala pode corresponder ao preço da licença de emissão de CO₂ para a atmosfera, sendo este preço fornecido pelo mercado de emissões. Assim, são apresentados quatro cenários possíveis para o factor de escala.

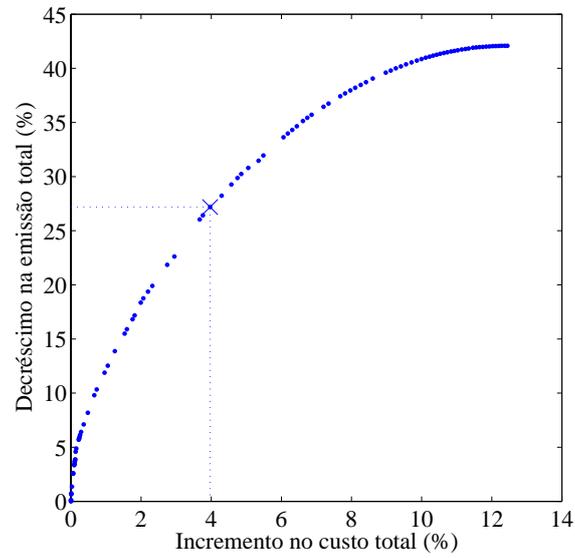


Figura 6: Soluções não dominadas da curva de Pareto para $\xi = 7$; na figura é assinalada com 'x' a solução de compromisso para $\zeta = 1$

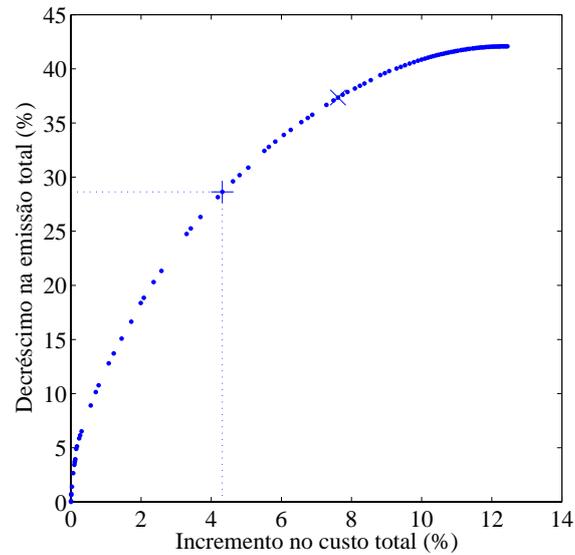


Figura 7: Soluções não dominadas da curva de Pareto para $\xi = 14$; na figura é assinalada com '+' a solução de compromisso para $\zeta = 1$

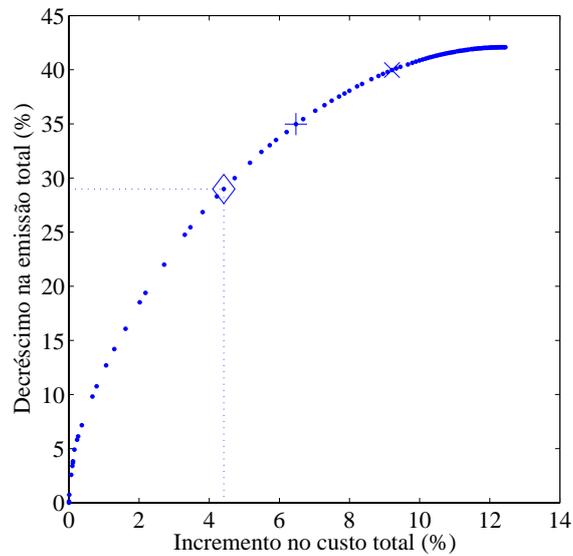


Figura 8: Soluções não dominadas da curva de Pareto para $\xi = 21$; na figura é assinalada com ‘◊’ a solução de compromisso para $\zeta = 1$

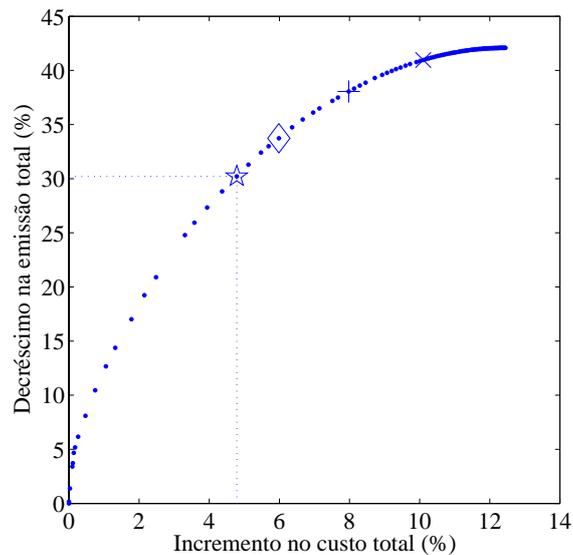


Figura 9: Soluções não dominadas da curva de Pareto para $\xi = 28$; na figura é assinalada com ‘*’ a solução de compromisso para $\zeta = 1$

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. Esta curva apresenta um ângulo de declive θ cerca de 90° para um factor de ponderação w cerca de 1, pelo que a solução se encontra próxima da solução correspondente ao custo total mínimo. Assim, por exemplo, para um incremento no custo total de 2.0% é obtido um decréscimo na

emissão total de 16.5%. A curva apresenta um ângulo de declive θ cerca de 0° para um factor de ponderação w cerca de 0, pelo que a solução se encontra próxima da solução correspondente à emissão total mínima. Assim, por exemplo, para o mesmo incremento no custo total de 2.0% é obtido apenas um decréscimo na emissão total de 0.9%. Em termos globais, para um incremento no custo total de 12.4% é obtido um decréscimo na emissão total de 42.1%.

As quatro curvas apresentadas permitem ilustrar a variação na distribuição das soluções não dominadas, ao longo da curva de Pareto, em função do factor de escala ξ . O factor de escala aumenta a preponderância da função objectivo emissão total comparativamente à função objectivo custo total, pelo que tende a aumentar o número de soluções não dominadas próximo da solução correspondente à emissão total mínima.

Na tabela 2 são apresentados os resultados comparativos para a afectação de unidades. Assim, à medida que o factor de escala ξ aumenta, a melhor solução de compromisso aproxima-se da solução correspondente à emissão total mínima.

Tabela 2: Resultados comparativos para a afectação de unidades

Afectação de unidades	Factor de escala	Custo total (\$)	Energia total (MWh)	Emissão total (Mg)
Custo total mínimo $w = 1$	-	12 994 446	425 508	601 229
Emissão total mínima $w = 0$	-	14 611 950	425 508	348 237
Melhor solução de compromisso	$\xi = 7$	13 510 222	425 508	437 812
	$\xi = 14$	13 555 299	425 508	429 086
	$\xi = 21$	13 568 139	425 508	426 994
	$\xi = 28$	13 589 192	425 508	423 791

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

Perante os novos compromissos internacionais estabelecidos pelo Protocolo de Quioto, os custos provenientes das emissões de GEE devem ser internalizados. Assim, o problema de optimização da exploração de recursos térmicos deve ter em consideração simultaneamente o objectivo económico e o objectivo ambiental.

A resolução deste problema foi obtida através de uma nova metodologia baseada em optimização multiobjectivo, que tem em consideração o conflito entre os objectivos considerados no sentido de suportar a decisão da afectação de unidades em mercado de emissões. A melhor solução de compromisso, entre a solução correspondente ao custo total mínimo e a solução correspondente à emissão total mínima, foi determinada em função de um 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.

6 Referências

- Abdul-Rahman, K. H., Shahidehpour, S. M., Aganagic, M., and Mokhtari, S. (1996) A Practical Resource Scheduling with OPF Constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 254-259.
- Abido, M. A. (2003) Environmental/Economic Power Dispatch using Multiobjective Evolutionary Algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 1529-1537.
- Bellhouse, G. M. and Whittington, H. W. (1996) Simulation of Gaseous Emissions from Electricity Generating Plant, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 8, pp. 501-507.
- Catalão, J., Mariano, S., Mendes, V., and Ferreira, L. (2005) Unit Commitment with Environmental Considerations: A Practical Approach, *Proceedings of the 15th Power Systems Computation Conference*, Liege, Belgium.
- Catalão, J. P. S. (2006) *Novas Metodologias de Optimização em Sistemas de Energia Hidrotérmicos*, Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Chen, P. -C. and Huang, C. -M. (2004) Biobjective Power Dispatch using Goal-Attainment Method and Adaptive Polynomial Networks, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 4, pp. 741-747.
- Chiang, C. -L., Liaw, J. -H., and Su, C. -T., New Approach with a Genetic Algorithm Framework to Multi-Objective Generation Dispatch Problems, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 381-395.
- Dhillon, J. S. and Kothari, D. P. (2000) The Surrogate Worth Trade-Off Approach for Multiobjective Thermal Power Dispatch Problem, *Electric Power Systems Research*, Vol. 56, No. 2, pp. 103-110.
- Ferreira, L. A. F. M., Anderson, T., Imparato, C. F., Miller, T. E., Pang, C. K., Svoboda, A., and Vojdani, A. F. (1989) Short-Term Resource Scheduling in Multi-Area Hydrothermal Power Systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 200-212.
- Gjengedal, T. (1996) Emission Constrained Unit-Commitment (ECUC), *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 1, pp. 132-138.
- Hota, P. K. and Dash, S. K. (2004) Multiobjective Generation Dispatch through a Neuro-Fuzzy Technique, *Electric Power Components and Systems*, Vol. 32, No. 11, pp. 1191-1206.
- Kuloor, S., Hope, G. S., and Malik, O. P. (1992) Environmentally Constrained Unit Commitment, *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, Vol. 139, No. 2, pp. 122-128.
- Mendes, V. M. F., Mariano, S. J. P. S., Catalão, J. P. S., and Ferreira, L. A. F. M. (2004) Emission Constraints on Short-Term Schedule of Thermal Units, *Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference*, Bristol, UK.
- Miettinen, K. M. (1999) *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer Academic, Norwell, USA.
- Muslu, M. (2004) Economic Dispatch with Environmental Considerations: Tradeoff Curves and Emission Reduction Rates, *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, No. 2, pp. 153-158.
- Padhy, N. P. (2004) Unit Commitment — A Bibliographical Survey, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 1196-1205.
- Pires, D. F., Martins, A. G., and Antunes, C. H. (2004) Modelo Multiobjetivo para Apoio à Localização de Condensadores em Redes Radiais de Distribuição, *Investigação Operacional*, Vol. 24, No. 2, pp. 139-157.
- Snyder, W. L., Jr., Powell, H. D., Jr., and Rayburn, J. C. (1987) Dynamic Programming Approach to Unit Commitment, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 339-350.