

MÉTODOS DE OPTIMIZAÇÃO APLICADOS NA DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE GERAÇÃO EM CENTRAIS TÉRMICAS COM RESTRICÇÕES DE EMISSÕES

João Catalão¹, Sílvio Mariano^{1*}, Victor Mendes² e Luís Ferreira³

1: Departamento de Engenharia Electromecânica
Universidade da Beira Interior
R. Fonte do Lameiro, 6201-001 Covilhã, Portugal
e-mail: {catalao,sm}@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: vfmendes@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

Palavras-chave: Apoio à Decisão, Optimização Aplicada, Perfil de Geração, Centrais Térmicas, Restrições de Emissões

Resumo. *Este artigo trata o problema do planeamento, num horizonte temporal de curto prazo, da conversão da energia dos combustíveis fósseis para a forma de energia eléctrica, tendo como função objectivo o custo dos combustíveis ou as emissões poluentes, sendo as restrições quer de potência total quer técnicas. Este problema consiste na determinação do perfil mais adequado para a geração das unidades das centrais térmicas ao longo do horizonte temporal. O problema é formulado como um problema de programação matemática e resolvido utilizando técnicas de programação dinâmica e programação não linear, tendo sido desenvolvido um sistema de apoio à decisão em linguagem Fortran para a sua solução. É apresentado um caso de teste e são discutidos os resultados obtidos.*

1. INTRODUÇÃO

Na grande maioria dos países os combustíveis fósseis nomeadamente carvão, fuelóleo ou gás são utilizados em percentagem significativa para suprir as necessidades energéticas. A maior indústria a nível mundial é a indústria de sistemas de energia eléctrica. A metodologia de disponibilizar energia na forma de energia eléctrica recorrendo às centrais térmicas ditas convencionais, por utilizarem como fonte de energia primária combustíveis de origem fóssil, tem efeitos reconhecidos com sendo nocivos e com significativa abrangência geográfica e no tempo sobre o ambiente [1]. Estes efeitos atribuídos às centrais térmicas originam preocupações, quer ao nível político, quer a nível empresarial. A nível político estas preocupações conduziram à elaboração do protocolo de Quioto, sob os auspícios da Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, que para os países industrializados estabelece limites na emissão de gases com efeito de estufa. Os seis principais gases com efeito de estufa são: dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, hidrofluorcarbonetos, perfluorcarbonetos e hexafluoreto de enxofre. Também a nível empresarial as questões ambientais constituem um factor que é explorado no sentido de permitir uma vantagem concorrencial para as empresas que asseguram a preservação dos habitats.

O protocolo de Quioto é o principal acordo internacional para combate às alterações climáticas e entrou em vigor após ratificação da Federação Russa a 16 de Fevereiro de 2005, sete anos depois de ter sido elaborado, terminando a incerteza ocasionada em 2001 pela recusa dos Estados Unidos da América, o maior emissor mundial de gases com efeito de estufa, em ratificar o protocolo, argumentando que o acordo é injusto e prejudicial para a sua economia, não fixando metas obrigatórias para os países em desenvolvimento. Sem os Estados Unidos, o sim da Federação Russa era vital para que se cumprissem os requisitos para a entrada em vigor do protocolo: ser ratificado por 55 por cento dos países signatários, nos quais estivessem representadas 55 por cento das emissões a nível mundial em 1990, ano base de referência para o protocolo de Quioto. Com a Federação Russa, o número de ratificações subiu para 128 e as emissões para 62 por cento.

A fraca pluviosidade que recentemente tem ocorrido em Portugal com a consequente quebra de produção hídrica, assim como o fraco contributo das centrais eólicas, vem agravar a dependência dos combustíveis fósseis para a produção de energia eléctrica. Os combustíveis fósseis satisfaziam 56 por cento da demanda de energia eléctrica em Fevereiro de 2004, enquanto que, em Fevereiro de 2005, 86 por cento da produção de energia eléctrica teve origem em combustíveis fósseis. Portugal já atingiu em 2002 cerca de 41 por cento de aumento das suas emissões em relação a 1990, sendo o limite estabelecido de 27 por cento para o período 2008-2012. Ainda, Portugal foi o único, na Europa a Vinte e Cinco, que entre 1990 e 2002 aumentou as suas emissões de gases com efeito de estufa em relação ao PIB — Produto Interno Bruto, isto é, aumentou a sua intensidade de emissões. Deste modo, necessitamos actualmente de emitir mais gases com efeito de estufa para gerar riqueza do que em 1990, facto que é desfavorável do ponto de vista da nossa economia. Consequentemente, Portugal tem não só que melhorar a eficiência na utilização de recursos energéticos, mas também utilizar métodos de

optimização para o apoio à decisão na determinação do perfil de geração em centrais térmicas, considerando que as restrições de emissões de gases com efeito de estufa são indispensáveis para evitar pesados encargos provenientes de continuar a exceder a sua cota de emissões poluentes.

O problema da determinação do perfil de geração em centrais térmicas considerando restrições de emissões é fundamental para criar um sistema de apoio à decisão que permita a tomada de decisões em conformidade com os níveis de poluição estabelecidos. Estas restrições têm sido consideradas principalmente no problema de despacho económico [2-8], visando determinar unicamente o nível de geração de cada unidade em serviço, isto é, não é considerado na decisão que se possam desligar as unidades. O despacho económico não decide quais as unidades que devem entrar em produção e quando, pelo que o parque das unidades em operação é reduzido às unidades previamente afectadas.

O problema do planeamento da conversão da energia dos combustíveis fósseis para a forma de energia eléctrica em centrais térmicas, também denominado de afectação de unidades [9-11], é um problema hierarquicamente superior ao despacho económico, visto que, cumpre neste problema determinar quais as unidades que estão ligadas. Se não forem consideradas restrições de emissões no problema de afectação de unidades, uma unidade de custo reduzido, mas altamente poluente, pode ser afectada para despacho económico.

Neste artigo é proposto um método de optimização usando programação dinâmica e programação não linear, que considera as emissões poluentes no problema de afectação de unidades. Ainda, é apresentado um caso de teste, sendo comparados e discutidos os resultados obtidos com e sem a consideração de emissões poluentes.

2. COMBUSTÍVEIS FOSSEIS

Nas centrais térmicas convencionais o combustível fóssil, carvão, fuelóleo ou gás é queimado em caldeiras convertendo a energia química do combustível em calor, uma parte radiante e outra por convecção que se perde nos gases quentes que saem pela chaminé, sendo um deles o dióxido de carbono.

Uma parte do calor radiante é transferida para um fluido, geralmente água à qual se extrai o oxigénio dissolvido para minorar os efeitos corrosivos. A água ao receber o calor é levada a passar do estado líquido ao gasoso, vapor, iniciando o processo de conversão da energia para a forma de energia eléctrica no grupo turbina-gerador.

O carvão é composto por carbono, hidrogénio, oxigénio, nitrogénio e impurezas que são geralmente retiradas, embora após a limpeza permaneçam vestígios dispersos no carvão. O carvão permitiu um progresso significativo na história da humanidade, tendo à dois séculos atrás sido o combustível que proporcionou a Revolução Industrial. O carvão é de todos os combustíveis fósseis o que existe em maior quantidade na natureza e as suas reservas estão distribuídas por diversos países, ao contrário dos outros combustíveis fósseis. Consequentemente, o carvão é o mais barato dos combustíveis fósseis.

O petróleo bruto era já conhecido nas zonas do mar Negro e do Cáspio antes do nascimento de Cristo e usado para aquecimento, mas só na segunda metade do século dezanove com o aumento de preço do óleo de Baleia se tornou numa fonte de energia

primária importante, originando por refinação diversos produtos, destilados leves, médios e pesados, sendo o fuelóleo um desses destilados. O fuelóleo é mais fácil de transportar, sendo necessário menos quantidade, comparativamente com o carvão, para se obter a mesma quantidade de calor, origina menos emissões poluentes, para além de que acende e apaga mais facilmente do que o carvão. Portanto, o fuelóleo representou um progresso significativo relativamente ao carvão.

Só há cerca de meio século atrás é que o gás natural começou a ser valorizado como combustível, sendo actualmente um combustível importante composto por aproximadamente 92 por cento de carbono e hidrogénio, sendo facilmente compressível e inodoro o que obriga como segurança a introdução de um odor adicional. O gás natural tem um poder calorífico superior ao carvão e ao fuelóleo, origina temperaturas mais elevadas o que permite melhor eficiência, acende e apaga rapidamente, produzindo cerca de metade do dióxido de carbono produzido pelo carvão em idênticas circunstâncias, sendo livre de enxofre, isto é, não originando dióxido de enxofre. Contudo, as reservas terrestres conhecidas do gás natural são menores e bastante mais localizadas que as de carvão. No futuro, a evolução da tecnologia associada ao carvão, dando origem ao chamado carvão limpo de emissões reduzidas, poderá suplantar a vantagem em termos de emissões do gás natural.

No caso da fonte primária ser o carvão, ele é geralmente pulverizado para ser injectado juntamente com ar sobre pressão na fornalha da caldeira, originando no ponto de queima uma temperatura da ordem dos 1500°C. A queima origina, além de calor, materiais incombustíveis sobre a forma de cinzas que podem conter traços de metais prejudiciais, como o mercúrio. As cinzas são em parte acumuladas na parte inferior da fornalha da caldeira, sendo a outra parte enviada para a atmosfera juntamente com os gases quentes provenientes da combustão, como por exemplo o dióxido de carbono, o principal responsável pelo aumento do efeito de estufa. Ainda, devido às temperaturas de combustão elevadas, também resulta o óxido nitroso, quer devido à existência de nitrogénio no carvão quer no ar, e a presença do enxofre no carvão origina dióxido de enxofre que na atmosfera após reacção origina as chuvas ácidas responsáveis por danos significativos no habitat terrestre, causando preocupações ambientais significativas.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A nomenclatura usada neste artigo para a formulação do problema é apresentada a seguir.

- I – Conjunto dos índices i para as unidades
- J – Conjunto dos índices j para as restrições por estádio
- N – Conjunto dos índices n para as restrições ao longo do horizonte temporal
- K – Conjunto dos índices k dos estádios ao longo do horizonte temporal
- D_k – Demanda de energia eléctrica em cada estádio k
- A_{jk} – Conjunto de unidades que têm que satisfazer a restrição j em cada estádio k
- B_n – Conjunto de unidades que têm que satisfazer a restrição n

- C_{ik} – Custo total para a operação da unidade i no estádio k
- x_{ik} – Variável de estado da unidade i no estádio k
- x – Vector das variáveis de estado ao longo do horizonte temporal
- X_{i0} – Conjunto dos estados iniciais possíveis para a unidade i
- X_{if} – Conjunto dos estados finais possíveis para a unidade i
- u_{ik} – Variável inteira de decisão para a unidade i no estádio k
- u – Vector das variáveis inteiras de decisão ao longo do horizonte temporal
- p_{ik} – Variável de decisão para o nível de potência da unidade i no estádio k
- p – Vector das potências das unidades ao longo do horizonte temporal
- F_{ji} – Contribuição da unidade i para o requisito j
- H_{ni} – Contribuição da unidade i para a satisfação do requisito n
- G_{ik} – Função de transição de estado da unidade i no estádio k
- P_{ik} – Conjunto das potências possíveis para a unidade i no estádio k
- U_{ik} – Conjunto das variáveis inteiras possíveis para a unidade i no estádio k
- \bar{p}_i – Potência máxima possível para a unidade i
- \underline{p}_i – Potência mínima possível para a unidade i

O problema do planeamento num horizonte temporal de curto prazo, em centrais térmicas, da conversão da energia dos combustíveis fósseis para a forma de energia eléctrica consiste em estabelecer uma escala de funcionamento possível das unidades térmicas, sendo tomadas decisões em estádios discretos, tipicamente de uma hora, ou meia hora, durante um horizonte temporal de um dia a uma semana.

Neste artigo é apresentado um sistema de apoio à decisão que permite satisfazer a demanda de energia eléctrica tendo simultaneamente em consideração a emissão poluente que deriva do uso dos combustíveis fósseis nas centrais térmicas. Alguns dos dados necessários para a caracterização do problema do planeamento num horizonte temporal de curto prazo em centrais térmicas são por natureza estocásticos, como por exemplo a demanda de energia eléctrica ao longo do horizonte temporal, mas atendendo a que se trata de um horizonte de curto prazo, as suas previsões são consideradas, pelo que o problema é tratado como um problema de programação matemática determinístico.

A função objectivo é o custo total do combustível usado na conversão para se satisfazer a demanda ao longo do horizonte temporal, sendo calculada pela expressão:

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

A função custo do combustível usado na conversão apresenta duas parcelas: uma parcela, dita de custo de arranque, determinada pelo combustível que é utilizado para que a unidade arranque, isto é, seja conduzida a condições de funcionamento que permitam a conversão de energia; outra parcela, dita de custo de operação, determinada pelo

combustível cuja energia é efectivamente utilizada para ser convertida para a forma de energia eléctrica. Na simulação computacional o custo de arranque é para cada unidade considerado constante. A função que determina o custo de operação é aproximada por uma série de Taylor até a segunda ordem, dada por:

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

O nível de emissão poluente de uma unidade também é aproximado por uma série de Taylor até a segunda ordem, dada por:

$$E_{ik}^{em}(u_{ik}, p_{ik}) = u_{ik} (a_i + b_i p_{ik} + c_i / 2 p_{ik}^2) \quad (3)$$

Consequentemente, o problema consiste na minimização da função objectivo apresentada na equação (1) sujeita a restrições que podem ser de dois tipos: do tipo global ou do tipo local. Por exemplo, a limitação do nível de emissão poluente acumulada ao longo do horizonte temporal é uma limitação do tipo global. A soma da potência produzida pelas unidades térmicas deve igualar a demanda de energia eléctrica em cada estádio:

$$\sum_{i \in I} p_{ik} = D_k \quad k \in K \quad (4)$$

As restrições do tipo global podem ainda ser classificadas em restrições envolvendo só um estádio, dadas pela equação (5), e restrições ao longo do horizonte temporal envolvendo mais de que um estádio, dadas pela equação (6):

$$\sum_{i \in A_{jk}} F_{ji}(x_{ik}, p_{ik}) \geq F_{jk}^{req} \quad j \in J, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in B_n} \sum_{k \in K} H_{ni}(x_{ik}, u_{ik}, p_{ik}) \geq H_n^{req} \quad n \in N \quad (6)$$

As restrições do tipo local são imposições quer no valor das variáveis de estado que são determinadas pela função de transição de estado para uma unidade:

$$x_{i,k+1} = G_{ik}(x_{ik}, u_{ik}) \quad (7)$$

$$u_{ik} \in U_{ik}(x_{ik}) \quad i \in I, k \in K \quad (8)$$

quer limitações nos estados e decisões, por exemplo, no nível de potência das unidades: se a unidade estiver em funcionamento, a potência está compreendida entre um valor mínimo e um valor máximo de potência possível; caso contrário, o nível de potência é nulo:

$$p_{ik} \in P_{ik}(u_{ik}) \quad i \in I, k \in K \quad (9)$$

ou ainda, a imposição sobre os estados iniciais e finais possíveis, descrita por:

$$x_{io} \in X_{i0} \quad x_{if} \in X_{if} \quad i \in I \quad (10)$$

As restrições dadas pelas equações (4) a (10) definem o conjunto dos planos para a operação que são possíveis:

$$S_{fea} \stackrel{Def}{=} \{(x, u, p) : \text{as restrições (4), (5) . . . (10) são satisfeitas}\}$$

e as restrições dadas pelas equações (7) a (10) definem o conjunto dos planos para a operação localmente possíveis:

$$\tilde{S}_{fea} \stackrel{Def}{=} \{(x, u, p) : \text{as restrições (7), (8), (9) e (10) são satisfeitas}\}$$

ou seja, definem o conjunto dos planos que satisfazem as restrições determinadas pelas unidades, mas não necessariamente as restrições globais.

O conjunto dos planos para a operação que são possíveis é um subconjunto do conjunto dos planos localmente possíveis para a operação:

$$S_{fea} \subseteq \tilde{S}_{fea}$$

O problema do planeamento num horizonte temporal de curto prazo, em centrais térmicas, da conversão da energia dos combustíveis fósseis para a forma de energia eléctrica é descrito sucintamente por:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x, u, p) \\ & \text{s.a} \\ & (x, u, p) \in S_{fea} \end{aligned} \tag{11}$$

Este problema é um problema de grande escala com variáveis inteiras associadas aos estados discretos das unidades e com variáveis contínuas associadas aos níveis de potência das unidades.

4. MÉTODO DE OPTIMIZAÇÃO

A programação dinâmica é um método matemático de optimização que tira partido do carácter sequencial que as decisões sobre um sistema podem assumir, sendo o teorema de Bellman o fundamento básico para este método. Caso a questão tenha uma fraca coesão sob o ponto de vista sequencial, sendo necessário recorrer, no que respeita à informação relevante do problema em consideração, a um grande número de estados em cada estágio para descrever de modo aceitável o comportamento, então os requisitos envolvidos na computação fazem baixar significativamente a eficácia desta técnica. Esta baixa significativa é dita de maldição da dimensão. A programação dinâmica requer, na sua aplicação a uma questão de optimização, que se proceda a uma formulação adequada.

A formulação requerida envolve noções idênticas às da teoria dos sistemas. Os estudos pioneiros da programação dinâmica advieram daquela teoria. Para formular o problema em programação dinâmica deve abstrair-se informação necessária para visionar este como um sistema em evolução ao longo de um conjunto de situações ordenadas. A cada uma destas

situações em que se decompõe a evolução dá-se o nome de estádio. A sequência de estádios por onde se assume que o sistema evolui entre estádios consecutivos de forma discreta em resposta às decisões que actuam o sistema em cada um dos estádios é o horizonte temporal do problema. E há ainda que ter em consideração outros elementos essenciais: as equações do sistema que descrevem o comportamento dinâmico do processo em consideração ao longo do horizonte do problema. O critério que determina a figura de mérito, isto é, que avalia o nível de desempenho atingido com a sequência das decisões tomadas ao longo do horizonte do problema, tem que satisfazer à propriedade Markoviana. No caso em estudo neste artigo, a equação (1) é decomponível logo satisfaz a propriedade Markoviana necessária para a aplicação da programação dinâmica.

O comportamento dinâmico é introduzido formalmente no modelo abstraído as equações ditas de estado. Este sistema de equações descreve num estádio genérico a transferência de estado resultante da actuação das decisões tomadas nesse estádio. Por exigência do método, a descrição matemática tem de ser transcrita para uma formulação do tipo apresentado na equação (7): as equações de estado têm que satisfazer o princípio da causalidade, isto é, a sequência de estados futuros é determinada unicamente pelo estado corrente e pelas decisões futuras através das equações de estado, portanto, é independente da evolução que conduziu no passado o sistema ao estádio actual; esta evolução fica registada no respectivo vector de estado corrente, sendo este uma síntese da história útil por onde o sistema evoluiu. O conjunto dos vectores de estado deve depender, quanto muito, do estádio onde o sistema se encontra e os valores admissíveis para o vector das decisões em cada estádio depende, quanto muito, do vector de estado e do estádio onde o sistema se encontra dado pela equação (8). Em cada estádio para uma unidade existem duas situações: ou a unidade está em interrupção ou está em funcionamento.

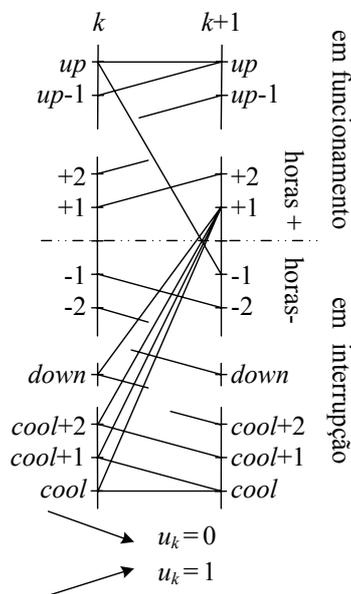


Figura 1. Exemplo de diagrama de transição de estado de uma unidade.

O conceito de estado está associado ao número de horas de funcionamento ou interrupção de uma unidade. Por exemplo, seja: up o mínimo tempo em funcionamento; $down$ o mínimo tempo em não funcionamento; $cool$ o tempo que corresponde ao arrefecimento total e portanto ao maior custo de arranque que a unidade apresenta. Então, o diagrama de transição de estado é o apresentado na Figura 1, sendo as horas em funcionamento descritas por inteiros positivos e as horas em interrupção de funcionamento descritas por inteiros negativos.

O número de estados de funcionamento é igual a up e o número de estados de interrupção é igual a $cool$. Resumindo tem-se:

- Se o estado do recurso for up , ele pode continuar em funcionamento, ou ser desligado.
- Se o estado do recurso estiver entre o estado 1 e o $up-1$, o recurso tem que permanecer em funcionamento.
- Se o estado do recurso estiver entre $down+1$ e -1 , o recurso tem que permanecer fora de operação.
- Se o estado do recurso for $cool$, ele pode continuar desligado, ou ser posto em funcionamento.

Para as unidades em funcionamento tem que se determinar qual é o nível de potência mais adequado para a satisfação da demanda, recorrendo a resolução de um problema de programação não linear para despacho económico, cuja solução envolve um algoritmo de decisão do tipo:

Algoritmo calcular p_{ik}^*

início

$$p_{ik}^* = (\lambda_k - \beta_i) / \gamma_i$$

$$\underline{\text{se}} \ p_{ik}^* > \bar{p}_i \ \underline{\text{então}} \ p_{ik}^* = \bar{p}_i$$

$$\underline{\text{se}} \ p_{ik}^* < \underline{p}_i \ \underline{\text{então}} \ p_{ik}^* = \underline{p}_i$$

fim.

sendo λ_k o custo incremental na hora k determinado pelo despacho económico.

5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional é baseada num caso de teste constituído por onze unidades térmicas, sendo o horizonte temporal de 168 horas.

Na Tabela 1 são indicados os coeficientes para as funções que determinam o custo de operação dado pela equação (2) e o nível de emissão poluente dado pela equação (3) para as onze unidades consideradas.

i	Custo			\underline{p}_i (MW)	\bar{p}_i (MW)	Emissão		
	α	β	γ			a	b	c
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
total				420	3695			

Tabela 1. Coeficientes de custo e emissão.

A demanda de energia eléctrica para o horizonte temporal considerado é a indicada na Figura 2.

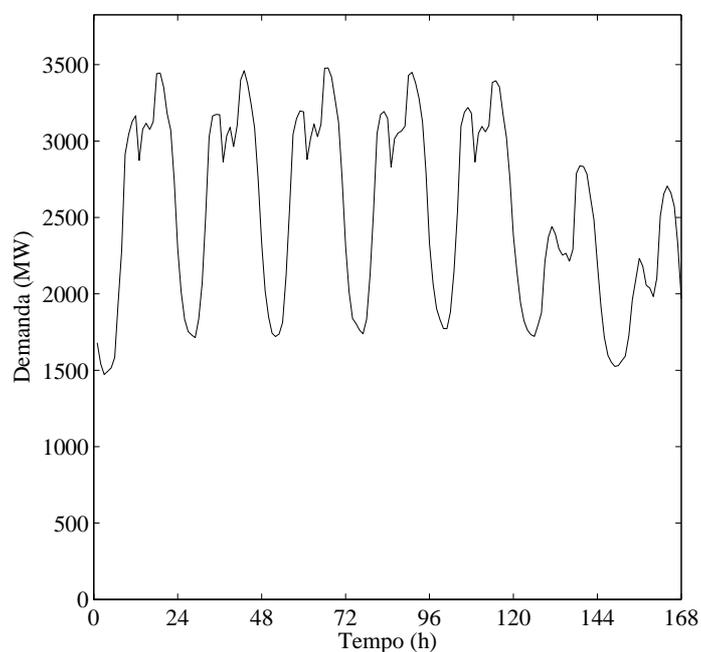


Figura 2. Demanda horária de energia eléctrica.

Nas Figuras 3 e 4, as linhas a traço cheio denotam o perfil de geração térmica sem a consideração de emissões poluentes, enquanto que as linhas a traço interrompido denotam o perfil de geração térmica com a consideração de emissões poluentes.

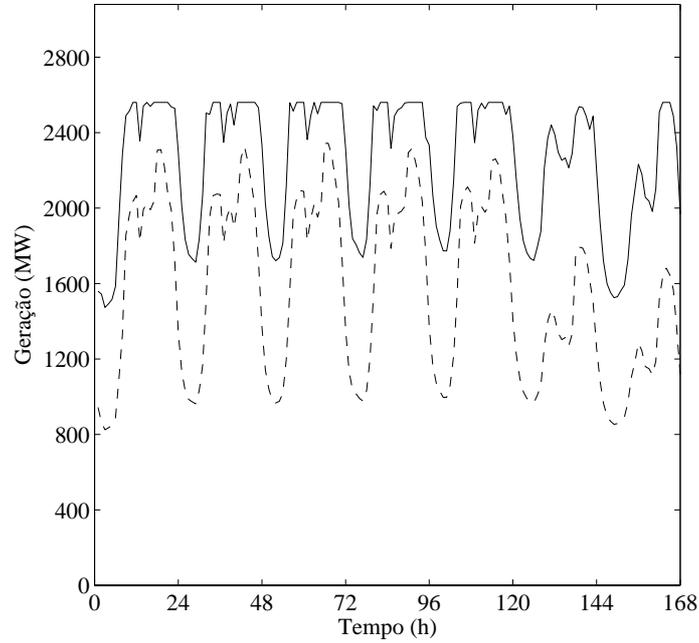


Figura 3. Perfil de geração térmica total horária para as unidades 1 a 6.

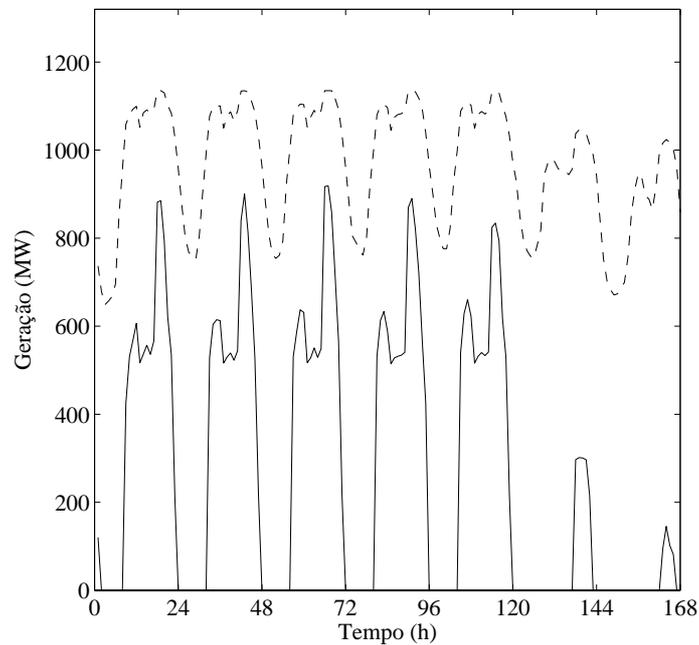


Figura 4. Perfil de geração térmica total horária para as unidades 7 a 11.

As unidades térmicas 1 a 6 apresentam custos inferiores às unidades térmicas 7 a 11, mas estas apresentam emissões mais reduzidas. Os resultados mostram que, ignorando as emissões, as unidades que apresentam custos inferiores são afectadas tipicamente à potência máxima, independentemente das emissões poluentes, não sendo necessário afectar todas as unidades para satisfazer a demanda. O perfil de afectação de unidades ignorando as emissões segue o perfil da demanda como se mostra na Figura 5.

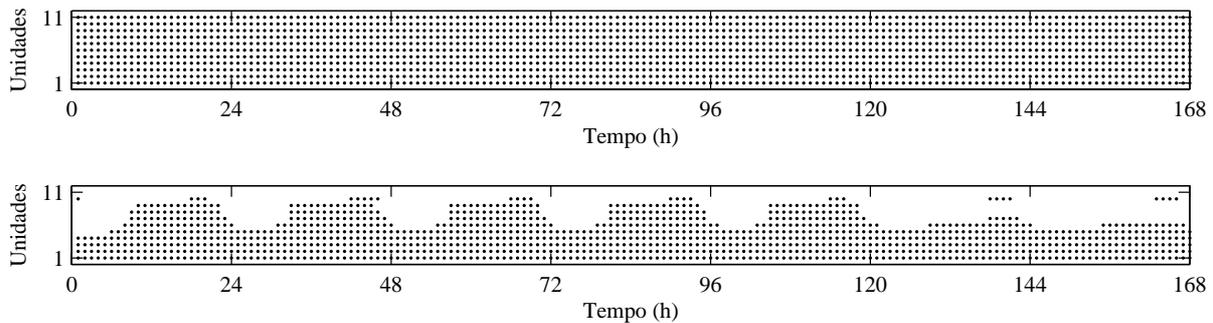


Figura 5. Estrutura matricial representando a afectação de unidades com e sem a consideração de emissões poluentes.

A consideração das emissões poluentes mostra que, no caso de teste, todas as unidades são afectadas. A emissão é 42 por cento inferior à anterior afectação, sendo o aumento no custo de 12 por cento. Na Tabela 2 são indicados resultados comparativos.

	Custo total (\$)	Geração térmica total (GW)	Emissão total (Gg)
Sem emissões	12998277	425.608	600.919
Com emissões	14614991	425.608	348.329

Tabela 2. Resultados comparativos.

6. CONCLUSÃO

A indústria de sistemas de energia eléctrica é a maior indústria a nível mundial. As centrais térmicas convencionais utilizadas em sistemas de energia eléctrica usam como fonte de energia primária combustíveis de origem fóssil com efeitos reconhecidos como nocivos sobre o meio ambiente, aumentando os gases com efeito de estufa, ocasionando chuvas ácidas, cujos custos ambientais foram externalizados no passado e que actualmente tendem para ser internalizados. O desenvolvimento sustentado e o controlo das emissões poluentes são hoje em dia preocupações que levaram à elaboração do protocolo de Quito, pelo que os efeitos nocivos das emissões poluentes têm que ser internalizados. Melhorar a eficiência no uso das fontes primárias de energia e um controlo nas emissões poluentes terá de ser realizado pelos países industrializados que ratificaram o protocolo para cumprir o estabelecido nele. O sector dos sistemas de energia eléctrica tem que considerar como

uma decisão importante quais as fontes primárias de energia que deve utilizar, a tecnologia e as quantidades de cada fonte disponível para que se assegure um ambiente saudável que não ponha em risco o meio ambiente. Neste artigo é estudado o problema do planeamento, num horizonte temporal de curto prazo, da conversão da energia dos combustíveis fósseis para a forma de energia eléctrica, tendo como função objectivo o custo dos combustíveis ou as emissões poluentes, sendo as restrições quer de potência total quer técnicas. Foi desenvolvido um código próprio em linguagem Fortran para criar um sistema de apoio à decisão para a obtenção do perfil mais adequado para a geração das unidades das centrais térmicas convencionais ao longo do horizonte temporal, em conformidade com níveis de poluição que venham a ser estabelecidos. É apresentado um caso de teste e feita uma comparação entre a consideração da minimização das emissões poluentes e a consideração da minimização do custo total de combustível.

REFERÊNCIAS

- [1] G.M. Bellhouse e H.W. Whittington, “Simulation of gaseous emissions from electricity generating plant”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* Vol. **18**, pp. 501-507, (1996).
- [2] B.F. Hobbs, “Emissions dispatch under the underutilization provision of the 1990 US Clean Air Act Amendments: models and analysis”, *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. **8**, pp. 177-183, (1993).
- [3] R. Ramanathan, “Emission constrained economic dispatch”, *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. **9**, pp. 1994-2000, (1994).
- [4] J.S. Dhillon e D.P. Kothari, “The surrogate worth trade-off approach for multiobjective thermal power dispatch problem”, *Electr. Power Syst. Res.* Vol. **56**, pp. 103-110, (2000).
- [5] C. Palanichamy e N.S. Babu, “Day-night weather-based economic power dispatch”, *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. **17**, pp. 469-475, (2002).
- [6] C. Huang e Y. Huang, “A novel approach to real-time economic emission power dispatch”, *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. **18**, pp. 288-294, (2003).
- [7] M.A. Abido, “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* Vol. **25**, pp. 97-105, (2003).
- [8] M. Muslu, “Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates”, *Electr. Power Syst. Res.* Vol. **71**, pp. 153-158, (2004).
- [9] S. Kuloor, G.S. Hope e O.P. Malik, “Environmentally constrained unit commitment” *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* Vol. **139**, pp. 122-128, (1992).
- [10] T. Gjengedal, “Emission constrained unit-commitment (ECUC)”, *IEEE Trans. Energy Convers.* Vol. **11**, pp. 132-138, (1996).
- [11] 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”, *Proc. 39th Int. Universities Power Eng. Conf.* Vol. **3**, pp. 1068-1072, (2004).