

# Unit Commitment in a Competitive and Emission Constrained Environment

J. P. S. Catalão, *Member IEEE*, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, L. A. F. M. Ferreira

**Abstract**— This paper is on the unit commitment problem, considering not only the economic perspective, but also the environmental perspective. We propose a bi-objective approach to handle the problem with conflicting profit and emission objectives. Numerical results based on the standard IEEE 30-bus test system illustrate the proficiency of the proposed approach.

**Keywords**— Emission constraints, bi-objective optimization, power generation dispatch.

## I. NOMENCLATURA

Lista de símbolos:

$k$	Índice de período	$\xi$	Factor de escala
$i$	Índice do recurso	$w$	Factor de ponderação
$m$	Índice do tipo de reserva	$C_{ik}$	Função de custo associada com a afectação do recurso $i$ no período $k$
$n$	Índice de restrição cumulativa	$R_{mi}$	Função que determina a contribuição do recurso $i$ para a restrição de reserva tipo- $m$
$K$	Conjunto dos índices de período	$H_{ni}$	Função que determina a contribuição do recurso $i$ para a restrição cumulativa tipo- $n$
$I$	Conjunto dos índices de unidade	$A_{ik}$	Função de estado associada com recurso $i$ no período $k$
$M$	Conjunto dos índices de tipo de reserva	$E_{ik}$	Função de emissão associada com a afectação do recurso $i$ no período $k$
$N$	Conjunto dos índices de restrição cumulativa	$\lambda$	Vector cujas coordenadas correspondem ao preço da energia eléctrica em cada período $k$
$x_{ik}$	Variável de estado para o recurso $i$ no período $k$	$\mathbf{x}$	Vector das variáveis de estado
$p_{ik}$	Potência entregue pelo recurso $i$ no período $k$	$\mathbf{p}$	Vector das variáveis contínuas de decisão
$u_{ik}$	Variável de afectação para o recurso $i$ no período $k$	$\mathbf{u}$	Vector das variáveis discretas de decisão
$D_k$	Potência determinada pela procura de energia eléctrica no período $k$	$\mathcal{F}_{ik}$	Conjunto das decisões admissíveis para o recurso $i$ no período $k$
$R_{mk}^{req}$	Limite inferior da restrição de reserva tipo- $m$ no período $k$	$\mathcal{H}_n$	Conjunto de todos os recursos com restrições cumulativas tipo- $n$
$H_n^{req}$	Limite superior da restrição cumulativa tipo- $n$	$\mathcal{U}_{ik}$	Conjunto das variáveis de afectação admissíveis para o recurso $i$ no período $k$
$X_i^0$	Conjunto dos estados iniciais do recurso $i$	$\mathcal{P}_{ik}$	Conjunto das potências admissíveis para o recurso $i$ no período $k$
$X_i^K$	Conjunto dos estados finais do recurso $i$		
$p_i^{\min}$	Potência mínima entregue pelo recurso $i$		
$p_i^{\max}$	Potência máxima entregue pelo recurso $i$		
$\eta_{ik}$	Eficiência do recurso $i$ no período $k$		
$\lambda_k$	Preço da energia eléctrica no período $k$		

## II. INTRODUÇÃO

A energia eléctrica está no cerne da sociedade contemporânea e do seu desenvolvimento, sendo uma componente essencial do nosso estilo de vida e um factor determinante na competitividade da economia. 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.

A energia eléctrica é um produto com características de produção particulares. Deve ser obtida a partir de fontes primárias de energia em resposta imediata às necessidades das instalações dos utilizadores de energia eléctrica, atendendo a que o seu armazenamento em larga escala não é economicamente favorável. Para que a energia eléctrica esteja sempre disponível nas instalações dos utilizadores na altura em que é requerida, é fundamental que a operação do sistema seja delimitada através de uma estrutura de planeamento

J. P. S. Catalão e S. J. P. S. Mariano são Professores Auxiliares no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, catalao@ubi.pt, sm@ubi.pt.

V. M. F. Mendes é Professor Coordenador com Agregação no Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, vfmendes@isel.pt.

L. A. F. M. Ferreira é Professor Catedrático no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, lmf@ist.utl.pt.

apropriada e com suficiente antecipação.

Esta estrutura de planeamento envolve um nível dito de planeamento operacional. O planeamento operacional consiste no problema da determinação da sequência de decisões admissíveis para a optimização da exploração dos recursos energéticos disponíveis para a obtenção de energia eléctrica, durante o horizonte temporal considerado no âmbito da operação do sistema e respeitando as restrições físicas e operacionais de cada recurso.

Neste artigo, o horizonte temporal considerado é de curto prazo, i.e., compreendido entre um ou mais dias até uma semana, tipicamente subdividido em períodos de meia hora ou de uma hora. Assim, o planeamento é formulado por um problema determinístico. Pelo que, quando o problema envolver incerteza nos dados, são usados os correspondentes valores previstos.

O contexto actual de reestruturação do sector eléctrico, promovendo a conversão de monopólios em mercados concorrenciais e possibilitando a liberdade de escolha do fornecedor de energia eléctrica por parte dos utilizadores, introduz a exigência de competitividade nas empresas produtoras. O desmantelamento do paradigma de integração vertical promoveu a coexistência de várias empresas produtoras em competição.

O desenvolvimento de novas metodologias de optimização, no sentido da maior racionalidade económica na exploração de recursos energéticos, é uma necessidade premente para as empresas produtoras em ambiente competitivo, tendo como objectivo vender energia eléctrica com o máximo de lucro.

Em ambiente competitivo, as consequências económicas das decisões de planeamento operacional adquirem crescente importância, que advém do enorme impacto que uma melhor decisão pode ter nas margens de lucro das empresas produtoras. Assim, um melhor meio de suporte computacional para a exploração de recursos energéticos que conduza a um lucro superior representa uma vantagem competitiva para as empresas produtoras.

A integração da vertente ambiental na política energética, em particular no sector eléctrico, é revestida de importância crescente na actualidade. A energia eléctrica em si é uma energia limpa. No entanto, ela tem associado à sua obtenção impactos ambientais negativos. As emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) são um dos impactos ambientais mais significativos associados à produção de energia eléctrica resultante da queima de combustíveis fósseis.

Perante os novos compromissos internacionais estabelecidos pelo Protocolo de Quioto, os custos provenientes das emissões de GEE devem ser internalizados nas metodologias propostas para o problema de optimização da exploração de recursos térmicos.

A restrição de emissões tem sido considerada principalmente no problema de despacho económico, onde existe um número considerável de referências bibliográficas algumas das quais recentes [1]-[8]. 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., quais as unidades a afectar.

Para o problema de afectação de unidades as referências bibliográficas são em número menos significativo e menos recentes [9]-[12]. O problema de afectação de unidades visa estabelecer um mapa de operações factíveis 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 estrutura de planeamento ordenada por uma 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.

A criação do mecanismo de comércio de emissões renovou o interesse na consideração das emissões no problema de afectação de unidades [13]-[14]. Contudo, tal foi considerado apenas em ambiente centralizado, e não em ambiente competitivo.

Este artigo incide sobre o problema de afectação de unidades térmicas, tendo em consideração não só a perspectiva económica, mas também a perspectiva ambiental. Uma metodologia baseada em optimização bi-objectivo é proposta para a resolução deste problema caracterizado pelo facto dos objectivos a atingir serem conflitantes: lucro e emissão. Os resultados obtidos num caso de estudo, baseado no standard IEEE 30-bus, permitem conclusões favoráveis sobre o desempenho da metodologia de optimização proposta.

### III. PROTOCOLO DE QUIOTO: RESTRIÇÃO DE EMISSÕES

O nosso planeta está envolvido por uma camada de gases que impede que os raios solares se escapem imediatamente da atmosfera, o que faria do planeta um local cerca de 33°C mais frio. Contrariamente, o aumento das emissões de GEE torna a camada de gases mais espessa, aumentando a retenção dos raios solares e consequentemente o efeito de estufa, ocasionando perturbações no clima. Os três principais GEE considerados no protocolo de Quioto são: dióxido de carbono, metano, e óxido nítrico. Ainda, são considerados GEE: hidrofluorcarbonetos, perfluorcarbonetos, e hexafluoreto de enxofre.

Três séculos após o início da revolução industrial, os países industrializados começam a tentar reduzir a factura dessa revolução. Para o ambiente a nível global as alterações climáticas são consideradas como uma ameaça séria, com manifestações visíveis, por exemplo, no aquecimento global do planeta em consequência do efeito de estufa [15].

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 a nível mundial devem ser reduzidas em 5%, de 2008 a 2012, comparativamente às emissões em 1990. Em concreto, a União Europeia (UE) e os seus Estados-membros em conjunto têm o compromisso de redução das emissões de

GEE em 8% [16]. 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 já 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 EUA em ratificá-lo.

A UE, 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 (CELE). Este 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, teve início em Janeiro de 2005 e vigorará durante dois intervalos de tempo: 2005-2007 e 2008-2012. O mercado de emissões abrange apenas o dióxido de carbono no intervalo de tempo 2005-2007. A partir de 2008, outros GEE serão abrangidos. O primeiro serviço de compra e venda de licenças de emissão inteiramente português, denominado ECOTRADE, negociou em menos de dois meses após o início de actividade, em Dezembro de 2005, 100 mil licenças no valor de 2,5 milhões de euros, o que faz com que seja responsável por 75% das transacções de licenças de emissão realizadas no país no âmbito do CELE. O mercado de emissões pode constituir uma oportunidade económica para a indústria portuguesa atenuar os efeitos das alterações climáticas, reconverter a sua tecnologia, promover um uso mais racional da energia reorientando decisões e comportamentos, e ainda beneficiar da venda de créditos de emissão.

As emissões de GEE por parte das empresas produtoras devem cumprir com os objectivos do Protocolo de Quioto para o País, assegurar a cobertura do aumento da procura de energia eléctrica, e proporcionar preços de mercado competitivos. Fica claro que a consideração de novas restrições de âmbito ambiental, em conjunto com as preocupações de cariz económico, é numa necessidade premente para as empresas produtoras na exploração dos recursos térmicos disponíveis.

#### IV. OPTIMIZAÇÃO EM CONTEXTO DE REESTRUTURAÇÃO

O sector eléctrico a nível global tem sofrido evoluções, desde o final da década de setenta, no sentido de introduzir concorrência neste sector, que tradicionalmente era considerado como um monopólio natural. Em 1982, o Chile foi pioneiro na implementação da reestruturação do sector eléctrico. Esta reestruturação alastrou posteriormente a outros países, tais como, Inglaterra e País de Gales, Países Nórdicos, Espanha e EUA. Em 2001, foi lançada a criação do Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) entre Portugal e Espanha, que entrou finalmente em actividade em 2007. A

reestruturação do sector eléctrico assenta na conversão dos monopólios em mercados concorrenciais, possibilitando a liberdade de escolha do fornecedor de energia eléctrica por parte dos utilizadores. Assim, assistiu-se ao processo de liberalização do sector eléctrico, no sentido de introduzir concorrência neste sector.

A liberalização do sector eléctrico permite a competição entre empresas produtoras, que oferecem energia numa bolsa de energia eléctrica, podendo ainda ser autorizadas a vender energia directamente a uma entidade compradora através de contratos bilaterais. A bolsa de energia eléctrica corresponde a uma entidade onde se estabelecem as ofertas de compra e venda de energia eléctrica perante um agente neutro face aos interesses estabelecidos nas ofertas: operador de mercado. As transacções resultam por cassação entre as ofertas de compra e venda, sendo assim determinado o preço de mercado e a quantidade negociada, como é ilustrado na Fig. 1.

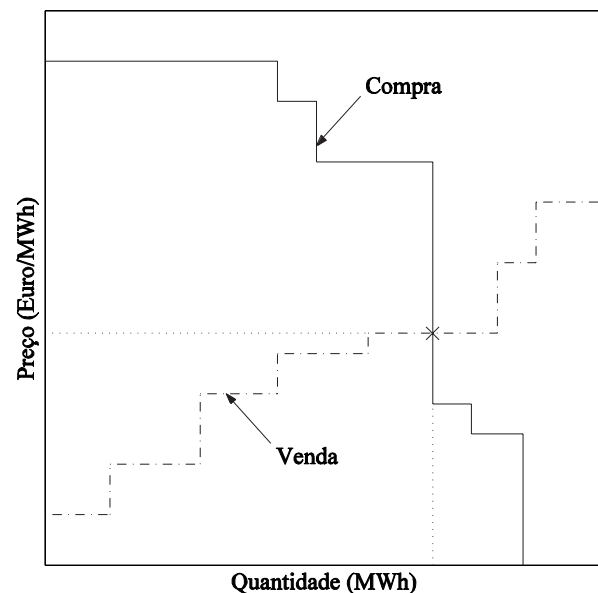


Figura 1. Processo de cassação entre as ofertas de compra e venda num mercado eléctrico.

A bolsa de energia eléctrica é condicionada pelos agentes em presença. Por um lado, existe poder de mercado quando o número de agentes do lado da oferta não é suficiente para evitar que alguns agentes possam controlar o preço de mercado — mercado oligopolístico. Por outro lado, o preço de mercado é caracterizado por um elevado grau de volatilidade resultante da incerteza competitiva criada, podendo variar de forma drástica. Assim, a previsão fiável dos preços da energia eléctrica é de crucial importância para as empresas produtoras em ambiente competitivo [17]-[18].

A optimização da exploração de recursos energéticos assume importância relevante no contexto actual de reestruturação do sector eléctrico para as empresas produtoras.

O problema de planeamento em ambiente centralizado corresponde ao problema de minimização do custo total de operação do sistema de produção de energia eléctrica, de forma a satisfazer a procura de energia eléctrica e outras restrições impostas pelo sistema.

A função objectivo a ser minimizada é dada por:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in K} C_{ik}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \quad (1)$$

A função objectivo em (1) é o custo total de operação, i.e., o custo de operação incorrido ao longo do horizonte temporal. A função de custo  $C_{ik}$  pode ser interpretada como uma medida que avalia a decisão tomada em cada estado, sendo o custo de operação associado à transição de estado, de  $x_{i,k-1}$  para  $x_{ik}$ , para cada recurso  $i$  que entrega a potência  $p_{ik}$  determinado pela decisão  $u_{ik}$ .

O valor óptimo da função objectivo é obtido pela resolução do problema de minimização 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:

$$\sum_{i \in I} p_{ik} = D_k \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} R_{mi}(x_{ik}, p_{ik}) \geq R_{mk}^{req} \quad m \in M \quad k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in \mathcal{H}_n} H_{ni}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \leq H_n^{req} \quad n \in N \quad (4)$$

em que:

$$(x_{ik}, p_{ik}) = A_{ik}(x_{i,k-1}, u_{ik}) \quad i \in I \quad k \in K \quad (5)$$

com:

$$x_{i0} \in X_i^0 \quad x_{iK} \in X_i^K \quad u_{ik} \in \mathcal{U}_{ik} \quad p_{ik} \in \mathcal{P}_{ik} \quad (6)$$

Em (2) é apresentada a restrição que descreve a satisfação da procura de energia eléctrica em cada período  $k$ , que tem que igualar a potência  $D_k$ , caso não se considerem as perdas por efeito de Joule nas linhas de transporte de energia eléctrica. Em (3) são apresentadas as restrições de capacidade do sistema em cada período  $k$ . Em (4) são apresentadas as restrições cumulativas durante o horizonte temporal. Em (5) são apresentadas as restrições operativas individualizadas para cada recurso, i.e., restrições do tipo local.

O problema de planeamento em ambiente competitivo corresponde ao problema de maximização do lucro total auferido com a exploração dos recursos em cada empresa produtora, e é facilmente derivável do anterior por particularização. Por exemplo, considere um produtor que pretende explorar um conjunto de recursos, num horizonte temporal de  $K$  períodos, face a um mercado eléctrico que estabelece um vector de preços  $\lambda$  cujas coordenadas correspondem ao preço da energia eléctrica em cada período  $k$ . Seja  $C_i^{op}(p_i, u_i)$  o custo de operação para o recurso  $i$  durante o horizonte temporal, quando se toma a decisão descrita respectivamente pelos vectores:  $p_i$  — variáveis de decisão

do tipo contínuo, e  $u_i$  — variáveis de decisão do tipo discreto. Para cada recurso  $i$  no período  $k$ , a variável  $p_{ik}$  corresponde à potência entregue, e a variável  $u_{ik}$  corresponde à decisão de afectar ou não o recurso à produção. Ainda, considere que não é necessária a variável de estado  $x_{ik}$ , i.e., os recursos não apresentam sequencialidade decisional, com o objectivo de proceder seguidamente a uma análise formal. Assim, a função objectivo a ser maximizada é dada por:

$$\sum_{i \in I} \left( \lambda p_i - C_i^{op}(p_i, u_i) \right) \quad (7)$$

A função objectivo em (7) é calculada pelo somatório da diferença entre o valor económico da produção e o custo de operação durante o horizonte temporal. Esta diferença constitui o conceito de lucro.

Consequentemente, o problema de planeamento em ambiente competitivo pode ser considerado como um problema de minimização, sendo formulado por:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \left( C_{ik}^{op}(p_{ik}, u_{ik}) - \lambda_k p_{ik} \right) \quad (8)$$

sujeito a:

$$(p_{ik}, u_{ik}) \in \mathcal{F}_{ik} \quad (9)$$

Caso a decisão seja de afectar o recurso  $i$  à produção no período  $k$ , esta produção é limitada de acordo com a condição:

$$p_i^{\min} \leq p_{ik} \leq p_i^{\max} \quad (10)$$

O conjunto das decisões admissíveis  $\mathcal{F}_{ik}$  para o recurso  $i$  no período  $k$  é dado por:

$$\mathcal{F}_{ik} = \{(0,0)\} \cup \{(p_{ik}, 1) : p_i^{\min} \leq p_{ik} \leq p_i^{\max}\} \quad (11)$$

Este problema de planeamento em ambiente competitivo admite a formulação seguinte mais adequada à análise formal:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \text{Min} \left( C_{ik}^{op}(p_{ik}, u_{ik}) - \lambda_k p_{ik} u_{ik} \right) \quad (12)$$

sujeito a:

$$p_i^{\min} u_{ik} \leq p_{ik} \leq p_i^{\max} u_{ik} \quad (13)$$

$$u_{ik} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

Assim, o problema é decomposto em problemas menores, sendo a solução obtida optando pelo curso de acção de maior lucro, escolhendo entre duas situações caracterizadas, respectivamente, por:  $u_{ik}=0$  e  $u_{ik}=1$ .

A condição a ser satisfeita para viabilizar o lucro com a entrada em produção é enunciada como se segue: só entra em produção se existir possibilidade de concretizar um lucro, i.e.,

se na opção  $u_{ik}=1$  existir uma estratégia admissível — uma potência entregue  $p_{ik}$  dentro dos limites expressos em (10) — tal que o valor da função objectivo do problema seja negativo para esta estratégia.

A entrada em produção do recurso  $i$  no período  $k$  fica determinada pela condição:

$$\exists p_{ik} \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}]: \lambda_k p_{ik} - C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1) \geq 0 \quad (15)$$

Atendendo à racionalidade económica é imediato inferir que caso não exista lucro, ou melhor, caso o valor do lucro seja inferior a zero, não deve existir entrada em produção. Ainda, caso  $p_i^{\min}=0$ , se  $C_{ik}^{\text{op}}(0,1) > 0$  nunca se poderá escolher a solução  $p_{ik}=0$  com  $u_{ik}=1$ , se esta for admissível, comparativamente à solução  $p_{ik}=0$  com  $u_{ik}=0$ , que terá custo nulo. Assumir-se-á sempre que a condição  $C_{ik}^{\text{op}}(0,1) > 0$  se verifica, ou então, que o limite inferior da potência entregue, quando em operação, é sempre superior a zero.

A condição expressa em (15) pode ser reescrita como:

$$\exists p_{ik} \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}] \setminus \{0\}: \lambda_k \geq \frac{C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1)}{p_{ik}} \quad (16)$$

O quociente  $C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1)/p_{ik}$  representa o custo unitário de operação. A condição expressa em (16) permite concluir que só existe lucro em operar com o recurso  $i$  no período  $k$  se o preço de mercado é maior ou igual ao valor do menor custo unitário de operação desse recurso. Isto significa, que se consegue produzir a um custo unitário menor ou igual ao preço que o mercado estabeleceu, estando a concretização do lucro por parte do produtor associada a este facto.

Seja o custo de operação para o recurso  $i$  aproximado por uma função convexa:

$$C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1) = \alpha_i + \beta_i p_{ik} + \gamma_i p_{ik}^2 \quad i \in I \quad k \in K \quad (17)$$

em que  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  são os coeficientes que determinam o custo de operação para o recurso  $i$  em função da potência entregue.

Atendendo a que a eficiência do recurso  $i$  no período  $k$  é dada por:

$$\eta_{ik} = \frac{p_{ik}}{C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1)} \quad i \in I \quad k \in K \quad (18)$$

o ponto de eficiência máxima do recurso  $i$  é obtido pela resolução do seguinte subproblema:

$$\text{Max} \quad \frac{p_{ik}}{C_{ik}^{\text{op}}(p_{ik}, 1)} \quad (19)$$

sujeito a:

$$p_i^{\min} \leq p_{ik} \leq p_i^{\max} \quad (20)$$

Resolvendo este subproblema obtém-se a potência correspondente à eficiência máxima do recurso  $i$ , dada por:

$$p_i^{\text{ef}} = \text{Min} \left\{ \text{Max} \left\{ p_i^{\min}, \sqrt{\frac{\alpha_i}{\gamma_i}} \right\}, p_i^{\max} \right\} \quad (21)$$

e obtém-se o preço da energia eléctrica correspondente à eficiência máxima do recurso  $i$ , i.e., o preço a partir do qual se consegue produzir obtendo lucro, dado por:

$$\lambda_i^{\text{ef}} = \text{Min} \left\{ \text{Max} \left\{ \lambda_i^{\min}, \beta_i + 2\sqrt{\alpha_i \gamma_i} \right\}, \lambda_i^{\max} \right\} \quad (22)$$

em que:

$$\lambda_i^{\min} = \beta_i + 2\gamma_i p_i^{\min} \quad i \in I \quad (23)$$

$$\lambda_i^{\max} = \beta_i + 2\gamma_i p_i^{\max} \quad i \in I \quad (24)$$

A potência mínima entregue quando o recurso entra em operação é igual à potência correspondente à eficiência máxima do recurso. Assim, fica claro que só existe lucro em operar com o recurso  $i$  no período  $k$  se o preço de mercado é maior ou igual ao preço correspondente à eficiência máxima do recurso, i.e., para  $\lambda_k \geq \lambda_i^{\text{ef}}$ .

Na Fig. 2 é apresentada uma ilustração para a exploração racional de um recurso face ao preço estabelecido pelo mercado eléctrico, sendo  $\lambda^0 < \lambda^{\text{ef}} \leq \lambda^1$ . Assim, para valores do preço  $\lambda^0 < \lambda^{\text{ef}}$  o produtor não está interessado em vender energia eléctrica no mercado, visto que, o valor do lucro é inferior a zero, i.e.,  $\lambda^0 p < C^{\text{op}}(p, 1)$ . Contrariamente, para valores do preço  $\lambda^1 \geq \lambda^{\text{ef}}$  o produtor está interessado em vender energia eléctrica no mercado, visto que, o valor do lucro é maior ou igual a zero, i.e.,  $\lambda^1 p \geq C^{\text{op}}(p, 1)$ . A potência entregue deve ser determinada pela condição de maximização do lucro total.

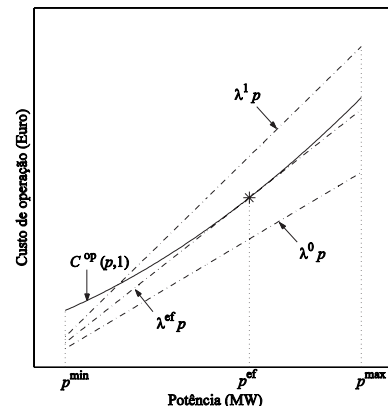


Figura 2. Exploração racional de um recurso face ao preço estabelecido pelo mercado eléctrico.

Concluindo: em ambiente centralizado, o conjunto de recursos tem que satisfazer a procura de energia eléctrica, impondo um funcionamento em economia fechada no sentido de se ter de produzir a totalidade das necessidades do bem requerido; contrariamente, em ambiente competitivo, a potência entregue pelos recursos é determinada pelas leis da oferta e da procura de energia eléctrica no mercado, não sendo o conjunto de recursos obrigado a produzir a totalidade das necessidades do bem requerido.

Assim, em ambiente competitivo, cada recurso só contribui para satisfazer a procura de energia eléctrica se o preço da energia eléctrica é maior ou igual ao preço a partir do qual consegue produzir obtendo lucro, não produzindo se o preço da energia eléctrica não permitir obter lucro.

### V. METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO BI-OBJECTIVO

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

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} C_{ik}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) - \lambda_k p_{ik} \quad (25)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} E_{ik}(x_{i,k-1}, p_{ik}, u_{ik}) \quad (26)$$

A função de custo  $C_{ik}$  considerada corresponde ao custo de combustível:  $C_{ik}^{op}$ , associado à quantidade de energia eléctrica obtida na conversão energética,  $C_{ik}^{arr}$ , associado ao gasto de combustível no arranque — custo de arranque. O custo de combustível na conversão energética é dado por um desenvolvimento em série de Taylor até à segunda ordem (17), enquanto que o custo de arranque é considerado como sendo constante.

A função objectivo em (26) é a emissão total de operação, i.e., a emissão na operação para todos os recursos ao longo do horizonte temporal.

A função de emissão  $E_{ik}$  considerada é determinada pela emissão incorrida na conversão energética  $E_{ik}^{op}$ , somada com a emissão durante o arranque  $E_{ik}^{arr}$ . A emissão durante o arranque é função do gasto de combustível nesse arranque.

A emissão incorrida na conversão energética é, neste artigo, dada por:

$$E_{ik}^{op}(p_{ik}, 1) = 10^{-2} (a_i + b_i p_{ik} + c_i p_{ik}^2) + d_i \exp(e_i p_{ik}) \quad i \in I \quad k \in K \quad (27)$$

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

O problema pode ser tipicamente abordado fazendo uso de duas metodologias: programação dinâmica; relaxação

Lagrangeana.

A programação dinâmica é usada para sistemas termoeléctricos de reduzida dimensão, evitando a maldição da dimensionalidade. Assim, ignorando restrições de carácter dinâmico, i.e., restrições de tempo mínimo de paragem e funcionamento ou restrições de tomada e deslastre de carga, o número de configurações possíveis para a afectação de unidades é de  $2^I$ , considerando apenas dois estados: ligado e desligado. Contudo, algumas dessas configurações poderão ser não admissíveis.

Para sistemas termoeléctricos de dimensão considerável é usada a metodologia baseada na relaxação Lagrangeana. A natureza binária da variável de controlo, em conjunto com as restrições de carácter dinâmico, aumenta de forma exponencial o número de configurações possíveis tornando inviável o uso directo da programação dinâmica.

A vantagem mais relevante que resulta da utilização da metodologia baseada na relaxação Lagrangeana 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.

Esta vantagem é conseguida pela relaxação das restrições do tipo global. O problema é resolvido existindo a possibilidade de violação destas restrições, que são penalizadas na função objectivo de forma linear recorrendo aos multiplicadores de Lagrange. Ou por outras palavras, é substituída a descrição explícita das restrições do tipo global por um termo adicionado à função objectivo que pode ser interpretado como um custo associado à violação dessas mesmas restrições, sendo criada uma nova função objectivo denominada de função de Lagrange. Após a fase de decomposição do problema surge a fase de coordenação do problema, tendo por meta adaptar correctamente as decisões de acordo com as restrições do tipo global.

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, apresentando características apropriadas aos problemas reais. Ainda, a descrição das restrições de carácter dinâmico é formalmente bem enquadrada nesta metodologia.

O problema de optimização bi-objectivo considerado neste artigo é formulado por:

$$\text{Min } \{f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}), g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})\} \quad (28)$$

sujeito a:

$$(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \in \mathcal{F} \quad (29)$$

As funções objectivo consideradas tendem a ser conflitantes, i.e., pode não existir uma solução única que minimize 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 [19], dada por:

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = w f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) + (1-w) \xi g(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \quad (30)$$

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 (30), cujo valor satisfaz à relação  $0 \leq w \leq 1$  de acordo com a metodologia da soma ponderada.

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

## VI. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo é baseado no standard IEEE 30-bus [1, 5], sendo o horizonte temporal de 168 horas. O diagrama unifilar do IEEE 30-bus é ilustrado na Fig. 3.

Este caso de estudo, constituído por um sistema termoeléctrico com seis unidades, foi escolhido para facilitar a discussão de resultados. No entanto, a metodologia proposta neste artigo pode ser aplicada em uma ampla gama de sistemas.

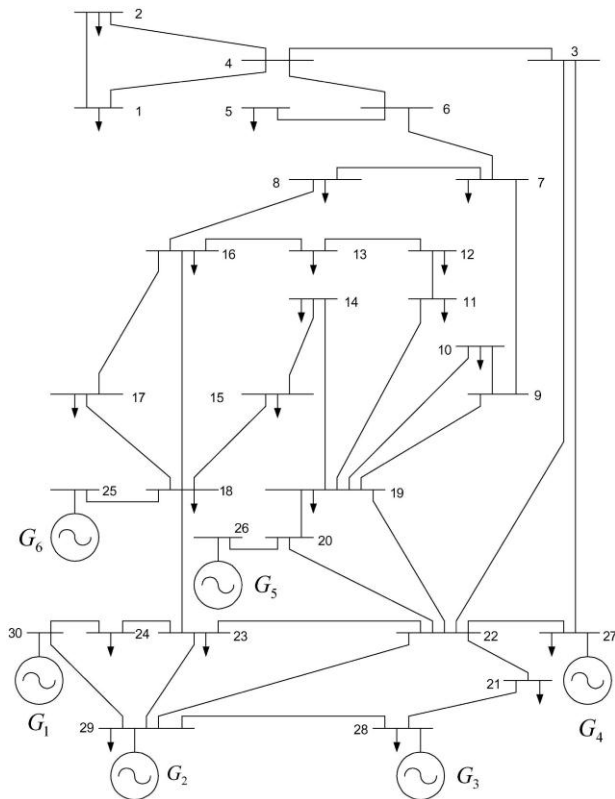


Figura 3. Diagrama unifilar do IEEE 30-bus.

Os coeficientes que determinam o custo de operação e a emissão na conversão energética [1, 5], bem como as características das unidades, são indicados na Tabela I.

TABELA I  
COEFICIENTES DE CUSTO E EMISSÃO, CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES

	1	2	3	4	5	6
$\alpha$	10	10	20	10	20	10
$\beta$	200	150	180	100	180	150
$\gamma$	100	120	40	60	40	100
$a$	4.091	2.543	4.258	5.426	4.258	6.131
$b$	-5.554	-6.047	-5.094	-3.550	-5.094	-5.555
$c$	6.490	5.638	4.586	3.380	4.586	5.151
$d$	2.0E-4	5.0E-4	1.0E-6	2.0E-3	1.0E-6	1.0E-5
$e$	2.857	3.333	8.000	2.000	8.000	6.667
$p_i^{\max}$ (MW)	50	60	100	120	100	60
$p_i^{\min}$ (MW)	5	5	5	5	5	5
Arranque (\$)	20	20	40	20	40	20
Min on (h)	2	2	2	2	2	2
Min off (h)	2	2	2	2	2	2

O perfil dos preços da energia eléctrica é apresentado na Fig. 4, sendo \$ uma quantidade monetária simbólica.

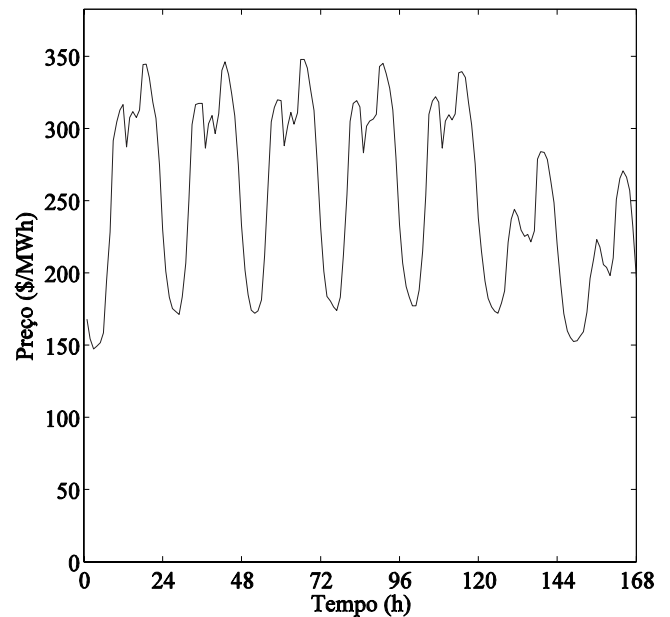


Figura 4. Perfil dos preços da energia eléctrica.

A metodologia de optimização proposta foi implementada num computador com processador a 2.8-GHz e 512 MB de RAM, usando linguagem FORTRAN. Inicialmente, a afectação de unidades é realizada considerando para função objectivo só o lucro total ou só a emissão total, i.e., são realizadas duas optimizações para se determinarem as soluções extremas da curva de Pareto. Posteriormente, o lucro total e a emissão total são considerados simultaneamente (30).

A produção horária total para  $w = \{0, 0.4, 0.5, 1\}$  é apresentada na Fig. 5.



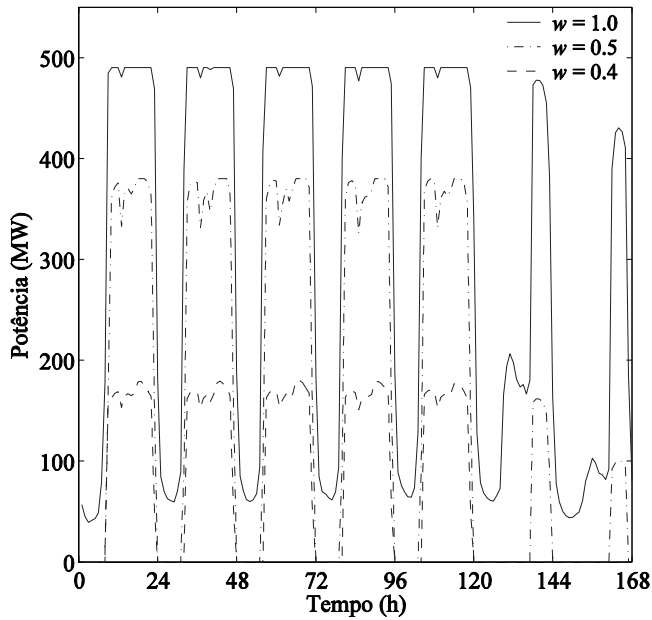


Figura 5. Produção horária total.

O número total de unidades afectadas em cada hora, para  $w = \{0, 0.4, 0.5, 1\}$ , é apresentada na Fig. 6.

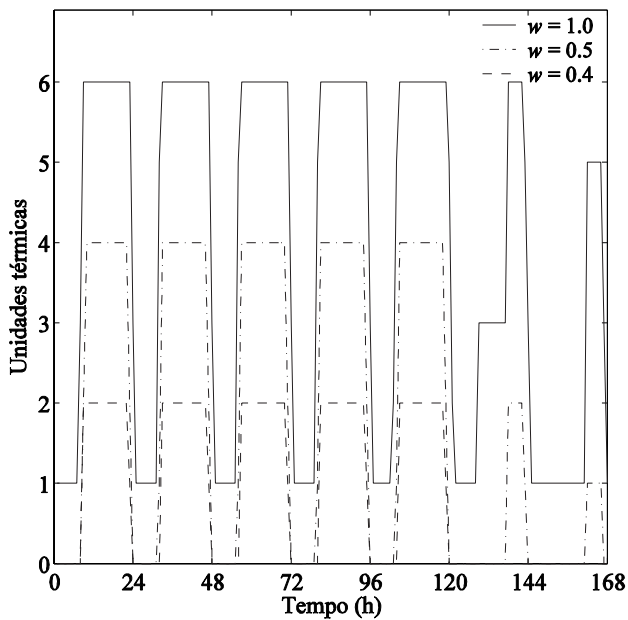


Figura 6. Número total de unidades afectadas em cada hora.

Nos resultados obtidos para  $w=1$ , as unidades são afectadas tendo em consideração apenas o lucro total, independentemente das emissões. O perfil de produção tende a seguir o perfil dos preços da energia eléctrica. Contudo, à medida que o factor de ponderação  $w$  varia entre 1 e 0, a produção horária total é reduzida de modo a diminuir a emissão total. Nos resultados obtidos para  $w=0$ , nenhuma unidade foi afectada, visto que, neste caso de estudo não existem unidades obrigatoriamente afectadas.

A curva de Pareto é apresentada na Fig. 7.

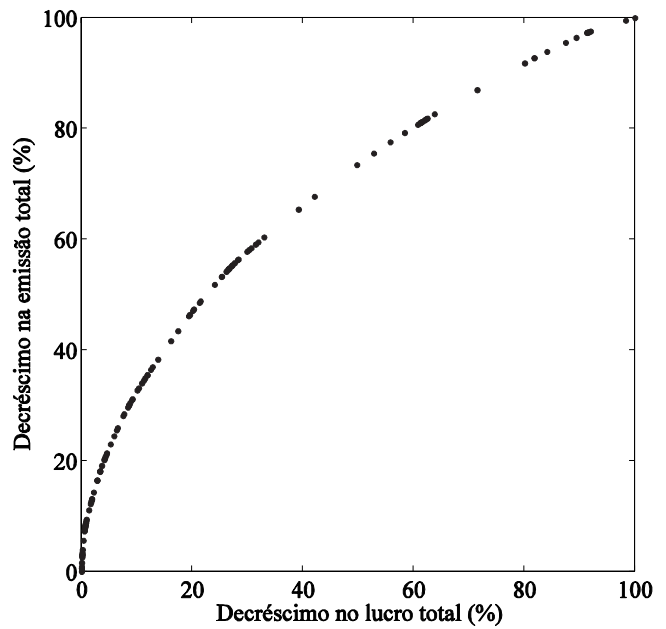


Figura 7. Curva de Pareto com 201 soluções não dominadas.

A curva de Pareto representa um compromisso entre o lucro total e a emissão total. Cada uma das 201 soluções não dominadas, apresentadas em consequência da variação do factor de ponderação  $w$  entre 0 e 1 com incrementos de 0.005, corresponde a uma afectação de unidades para o horizonte temporal de 168 horas. Esta curva apresenta um acentuado declive na origem. Assim, por exemplo, para um decréscimo no lucro total de 8.3% é obtido um decréscimo na emissão total de 29.7%. No final da curva sucede o oposto. Assim, por exemplo, para o mesmo decréscimo no lucro total de 8.3% é obtido apenas um decréscimo na emissão total de 2.6%.

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

TABELA II  
RESULTADOS COMPARATIVOS

	Lucro Total (\$)	Produção Total (MWh)	Emissão Total (Mg)
$w = 1.0$	36203	50564	2451
$w = 0.5$	26322	28116	1093
$w = 0.4$	13965	12004	461
$w = 0.0$	0	0	0

O tempo de computação requerido pela metodologia proposta é de 10.98s.

## VII. CONCLUSÕES

Neste artigo é proposta uma metodologia baseada em optimização bi-objectivo para a resolução do problema de afectação de unidades térmicas em ambiente competitivo e de restrição de emissões. A curva de Pareto, que representa um compromisso



entre o lucro total e a emissão total, é obtida para um caso de estudo baseado no standard IEEE 30-bus. Os resultados numéricos confirmam o bom desempenho da metodologia proposta, permitindo obter a curva de Pareto com um tempo de computação aceitável.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Abido, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1529-1537, Nov. 2003.
- [2] P.-C. Chen and C.-M. Huang, "Biobjective power dispatch using goal-attainment method and adaptive polynomial networks," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 741-747, Nov. 2004.
- [3] C.-L. Chiang, J.-H. Liaw, and 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, Jul.-Aug. 2005.
- [4] J. S. Dhillon and D. P. Kothari, "The surrogate worth trade-off approach for multiobjective thermal power dispatch problem," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 56, no. 2, pp. 103-110, Nov. 2000.
- [5] C.-M. Huang and F.-L. Wang, "An RBF network with OLS and EPO algorithms for real-time power dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 96-104, Feb. 2007.
- [6] S. Muralidharan, K. Srikrishna, and S. Subramanian, "Emission constrained economic dispatch — A new recursive approach," *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 343-353, Mar. 2006.
- [7] M. Muslu, "Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 2, pp. 153-158, Oct. 2004.
- [8] K. P. Wong and J. Yuryevich, "Evolutionary-programming-based algorithm for environmentally-constrained economic dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 301-306, May 1998.
- [9] K. H. Abdul-Rahman, S. M. Shahidehpour, M. Aganagic, and S. Mokhtari, "A practical resource scheduling with OPF constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 254-259, Feb. 1996.
- [10] T. Gjengedal, "Emission constrained unit-commitment (ECUC)," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 1, pp. 132-138, Mar. 1996.
- [11] S. Kuloor, G. S. Hope, O. P. Malik, "Environmentally constrained unit commitment," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 139, no. 2, pp. 122-128, Mar. 1992.
- [12] D. Srinivasan and A. G. B. Tettamanzi, "An evolutionary algorithm for evaluation of emission compliance options in view of the Clean Air Act Amendments," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 336-341, Feb. 1997.
- [13] J. Catalão, S. Mariano, V. Mendes, and L. Ferreira, "Unit commitment with environmental considerations: a practical approach," *15th PSCC*, Liege, Belgium, Aug. 2005.
- [14] J. P. S. Catalão, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, and L. A. F. M. Ferreira, "Short-term scheduling of thermal units: emission constraints and trade-off curves," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, Jan. 2008.
- [15] A. H. M. S. Ula, "Global warming and electric power generation: what is the connection?," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 6, no. 4, pp. 599-604, Dec. 1991.
- [16] A. Camyab, J. S. McConnach, "A more perfect energy union," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 47-56, Jul.-Aug. 2006.
- [17] A. T. Lora, J. M. R. Santos, A. G. Expósito, J. L. M. Ramos, and J. C. R. Santos, "Electricity market price forecasting based on weighted nearest neighbors techniques," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1294-1301, Aug. 2007.
- [18] J. P. S. Catalão, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, and L. A. F. M. Ferreira, "Short-term electricity prices forecasting in a competitive market: a neural network approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 10, pp. 1297-1304, Aug. 2007.
- [19] K. M.iettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Norwell: Kluwer Academic, 1999.

**J. P. S. Catalão** (M'04) recebeu o grau de Mestre pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, em 2003 e o grau de Doutor pela Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, em 2007.

É actualmente Professor Auxiliar na Universidade da Beira Interior. Os seus actuais interesses de investigação são optimização hídrica, afectação de unidades térmicas, previsão dos preços da energia eléctrica, sistemas de energia eólica, e mercados de energia eléctrica.

Dr. Catalão é Editor Associado do *International Journal of Power and Energy Systems*. Ainda, é avaliador regular no IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, no *IET Generation, Transmission & Distribution*, e no *Electric Power Systems Research*.

**S. J. P. S. Mariano** recebeu o grau de Mestre pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, em 1994 e o grau de Doutor pela Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, em 2002.

É actualmente Professor Auxiliar na Universidade da Beira Interior.

**V. M. F. Mendes** recebeu os graus de Mestre e Doutor pelo Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, em 1987 e 1994, respectivamente.

É actualmente Professor Coordenador com Agregação no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal. Os seus actuais interesses de investigação são coordenação hidrotérmica, teoria da optimização e suas aplicações, e energias renováveis.

**L. A. F. M. Ferreira** recebeu os graus de M.S.E.E. e Ph.D. pelo Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, em 1983 e 1986, respectivamente.

Desde 1986 até 1989, esteve na Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, CA, USA, onde foi o principal responsável pelo Hydro-Thermal Optimization program. É actualmente Professor Catedrático no Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.