

SIMULAÇÃO DE MERCADOS DE ENERGIA UTILIZANDO TEORIA DE JOGOS E AGENTES INTELIGENTES – DESCRIÇÃO DO MODELO

SILVA, P. S. , NEPOMUCENO, L.

*Laboratório de Estudos Econômicos em Sistemas de Potência - LEESP
UNESP / FE / DEE CP 473, CEP 17033-360
Bauru – SP*

E-mails: pss@feb.unesp.br , leo@feb.unesp.br

Abstract— The Brazilian energy sector is going through deep restructuring aiming to achieve competition in generation and energy trading. Both, planning and operation studies, which have been carried out by centralized optimization procedures, are currently implemented by means of market driven procedures. In such a context market simulation is crucial, so that the agents involved can establish their strategic trading decisions, and evaluate the strategic behavior of other agents. This work evaluates the applicability of multi-agent systems together with the game theory in energy market simulation, keeping as a main focus to provide the agents with a tool to maximize their profits. The work is written as a two part paper. In the first part, the proposed market simulation model is presented. The model accounts for transmission system representation, allowing the analysis of market power situations generated by transmission congestion. Some market strategies are investigated using the proposed market model, with emphasis in the Pool model. The results obtained, detailed in case studies described in the second paper (Silva e Nepomuceno, 2007), reassure that the Pool market structure using the spot price charging scheme is a good mechanism to promote investments in the power grid.

Keywords— Energy Market Simulation, Game Theory, Intelligent Agents, Generation Dispatch

Resumo— O setor elétrico do Brasil tem passado por transformações cujo objetivo principal é incentivar a competição nos processos de geração e comercialização de energia. Assim, os estudos de planejamento e a operação, normalmente baseados em otimização centralizada, têm sido substituídos por procedimentos regidos por regras de mercado. Neste contexto, a simulação de mercados é importante para que os agentes envolvidos possam estabelecer seu comportamento estratégico perante o mercado e avaliar o comportamento dos demais agentes. Este trabalho tem por objetivo investigar a aplicabilidade de Sistemas Multiagentes, aliada à Teoria dos Jogos, na busca do comportamento estratégico que permita aos agentes geradores maximizar seus lucros. Em função do conteúdo extenso, o trabalho é descrito em dois artigos. No primeiro, o modelo de simulação de mercado utilizado é descrito. Uma das características importantes deste modelo é a possibilidade de representação do sistema de transmissão, o que propiciou a análise de situações de poder de mercado gerada por congestionamentos. A partir do modelo proposto são investigadas algumas estratégias de mercado para o setor elétrico, dando ênfase ao modelo *Pool*. Os resultados obtidos são detalhados em estudos de caso descrito em (Silva e Nepomuceno, 2007). Os resultados confirmam que a estrutura de mercado *Pool* com remuneração ao preço *spot* é um bom mecanismo para fomentar investimentos na produção.

Palavras-chave— Simulação de Mercados de Energia, Teoria de Jogos, Agentes Inteligentes, Despacho de Geração

1 Introdução

No passado, a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica eram tratadas como monopólios naturais devido à economia de escala envolvida na construção desses sistemas. Atualmente, o setor elétrico de diversos países, incluindo-se o Brasil, tem passado por diversas transformações, cujo objetivo principal é incentivar a competição nos processos de geração e comercialização de energia (Ferreira, 2002).

No modelo verticalizado/regulado, anterior ao processo de desregulamentação, o planejamento e a operação eram feitos através de modelos de otimização centralizada. Atualmente, em vários países, os modelos centralizados têm sido substituídos por procedimentos regidos por regras de mercado. Dentre os modelos mais utilizados, destacam-se os mercados *Pool* e Bilateral. Os contratos bilaterais são estabelecidos entre comprador/produtor independentemente do operador do sistema. O *Pool* estabelece leilões de energia em que os agentes dão lances de com-

pra/venda e podem ou não obter sucesso, em suas negociações, dependendo dos lances ofertados. O modelo de leilão estabelecido pelo *Pool* é, em geral, formulado como um problema de Despacho de Geração. Em geral, os mercados adotam uma combinação dos mercados *Pool* e bilateral. Neste trabalho, apenas o mercado *Pool* é considerado.

É natural que os participantes do mercado tentem formar alianças para maximizar seus lucros. Porém, essas negociações deverão ocorrer praticamente sem a troca de informações vitais individuais. Nesse ambiente de informações incompletas os agentes precisarão de toda a ajuda computacional possível (Krishna; Ramesh, 1998). Assim, torna-se importante o desenvolvimento de modelos e ferramentas que possam auxiliar os agentes em seus processos de levantamento de estratégias de ação.

A Teoria dos Jogos tem sido amplamente empregada na análise de mercados de energia. Um levantamento bibliográfico bastante completo pode ser encontrado em Ferreira (2002), o qual é apresentado resumidamente a seguir. Conceitos de jogos estratégicos não-cooperativos e de equilíbrio de Nash são utilizados em (Bai et al., 1997) no qual todos os par-

ticipantes procuram maximizar seus lucros. O modelo leva em consideração as perdas ocorridas nas linhas. Ferrero et al. (1997) utilizam a Teoria dos Jogos para simular o processo de tomada de decisão de geradores térmicos. O modelo utiliza o critério de Maximim para resolver os jogos. Os resultados obtidos podem apontar as coalizões que serão danosas ao mercado. Krishna e Ramesh (1998) também apresentam um modelo que utiliza capaz de sugerir as estratégias para unidades térmicas. Stoft (1999) faz uso dos jogos de Nash-Cournot para encontrar meios de prever possíveis ações tais como conluio, cartel, monopólio, etc. (Kelman, 1999) também avalia o efeito do poder de mercado, utilizando o equilíbrio de Nash-Bertrand para encontrar as estratégias que maximizem o lucro dos agentes. A investigação é estendida para sistemas hidrotérmicos, onde as ofertas não são os preços, mas sim a quantidade de energia. O modelo é formulado por um problema de Programação Dinâmica Estocástica (PDE). Barroso (2000) traz uma análise de poder de mercado de agentes geradores hidrelétricos em sistema hidroelétricos, com despacho centralizado e baseado em lances, onde a estratégia de oferta ótima de um agente considera a possibilidade de maximizar o seu ganho imediato, através da venda de energia no mercado, ou maximizar os seus rendimentos futuros, com o armazenamento da água. O comportamento estratégico dos agentes foi simulado com um modelo de equilíbrio de Nash-Cournot. Medidas para mitigar o exercício do poder de mercado são discutidas. Em (Kelman et al., 2001), o poder de mercado é analisado em sistemas hidrotérmicos baseados em lance e é simulado como sendo um equilíbrio de Nash-Cournot de múltiplos estágios. A avaliação do poder de mercado é realizada utilizando-se a PDE. Medidas para mitigar o poder de mercado também são discutidas.

Apesar da grande aceitação da Teoria dos Jogos, aplicações da Tecnologia de Agentes Inteligentes no mercado de energia ainda são raras. A utilização de Sistemas Multiagentes limita-se, basicamente, aos trabalhos de Krishna e Ramesh (1998) e de Ferreira (2002). Este trabalho tem como objetivo investigar a aplicabilidade de Sistemas Multiagentes, aliada à Teoria dos Jogos, na busca do comportamento estratégico que permita às empresas do setor elétrico, regulado por regras de mercado, maximizar seus lucros. Diferentemente da maioria das abordagens anteriores, leva-se em consideração a representação do sistema de transmissão, o que tornou possível detectar situações típicas de poder mercado, geradas por congestionamentos. Em função do conteúdo extenso, o trabalho é descrito em dois artigos. Neste artigo é descrito o modelo de simulação de mercados utilizado e em Silva e Nepomuceno, 2007, são apresentados os resultados de estudos de casos envolvendo a metodologia proposta.

2 Organização de Mercados de Energia e Modelo de Despacho de Geração

Os mercados de energia foram propostos com o objetivo promover a competição nas atividades de geração e comercialização de energia, mas com regulação sobre as atividades de transmissão e distribuição, consideradas monopólios naturais. Uma característica fundamental dos mercados é a liberdade dos agentes consumidores e produtores para negociar através de um mercado centralizado (*Pool*) ou através de contratos bilaterais.

No mercado Bilateral a comercialização é feita de forma livre entre os agentes, sem a interferência de uma entidade centralizadora. Como as perdas não são consideradas, é necessária uma etapa adicional, denominada de alocação de perdas, a fim de distribuir entre os agentes os custos associados a tais perdas.

A comercialização realizada no *Pool* é feita de forma centralizada pelo Operador Independente do Sistema (OIS). Os geradores/consumidores elaboram seus lances de compra/venda (preço e montante de energia são ofertados), os quais são avaliados pelo OIS, através da solução de um modelo que busca a otimização dos recursos energéticos, juntamente com o atendimento da demanda e demais restrições do sistema. Em geral, os modelos de despacho do mercado *Pool* desprezam as perdas no sistema de transmissão, o que implica em uma etapa adicional para a alocação das perdas totais também entre os participantes do *Pool*.

Neste trabalho, as simulações de mercados levam em consideração apenas o mercado *Pool*, o qual está fundamentado nos seguintes princípios:

- As empresas geradoras devem fazer ofertas de produção de energia para o mercado;
- O despacho de geração é realizado pelo Operador Independente do Sistema (OIS) de maneira centralizada.
- O pagamento às empresas é realizado em função da geração das mesmas, tendo como base o preço *spot* do mercado.

O despacho é uma ferramenta utilizada pelo OIS com o objetivo de estipular os níveis de geração dos geradores, de modo que a carga seja plenamente atendida e os seus limites operacionais estejam dentro de faixas aceitáveis. O despacho é geralmente formulado como um problema de otimização restrito. O modelo utilizado neste trabalho é dado em (1), onde:

NG : número de geradores do sistema;

Pg_i : potência ativa gerada no gerador i ;

π_i : lance ofertado pelo gerador i ;

\mathbf{P} : vetor de injeções líquidas de potência ativa em cada barra do sistema;

\mathbf{B} : matriz de susceptâncias do sistema (Monticelli, 1983);

$\mathbf{\theta}$: vetor de ângulos da tensão fasorial em cada barra do sistema;

\mathbf{Pg} : vetor de geração de potência ativa em cada barra do sistema;

$\mathbf{Pg}^{\min}, \mathbf{Pg}^{\max}$: limites mínimos e máximos sobre \mathbf{Pg} ;

\mathbf{F} : vetor de fluxos de potência ativa em cada ramo do sistema, escrito como uma função linear dos ângulos das tensões fasoriais;

$\mathbf{F}^{\min}, \mathbf{F}^{\max}$: limites mínimos e máximos sobre \mathbf{F} ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \quad \sum_{i=1}^{NG} (\pi_i P g_i) \\ \text{s.a. :} \\ \mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{Pg}^{\min} \leq \mathbf{Pg} \leq \mathbf{Pg}^{\max} \\ \mathbf{F}^{\min} \leq \mathbf{F} \leq \mathbf{F}^{\max} \end{array} \right. \quad (1)$$

O despacho dado por (1) busca minimizar o custo global de geração associado aos lances dados pelos agentes geradores, levando-se ainda em consideração os limites de geração e de fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão. Neste modelo, a transmissão é representada em detalhe, ainda que com restrições linearizadas, abrindo espaço para a verificação de existência de poder de mercado associado a congestionamentos em linhas de transmissão.

3 Teoria de Jogos

A Teoria dos Jogos trata da modelagem de situações (jogos) de conflitos de interesse onde dois ou mais elementos tomadores de decisão (jogadores) se relacionam através de regras preestabelecidas (Ferreira, 2002). Os jogadores têm por objetivo obter o melhor resultado possível no jogo. Assim, cada um irá escolher uma, dentre as várias estratégias possíveis, levando em consideração a escolha dos demais participantes, uma vez que o seu resultado no jogo também depende da escolha destes. A solução de um jogo é o conjunto das melhores opções de cada participante, obtidas analisando-se os resultados que poderão ser obtidos pela combinação de todas as estratégias disponíveis para cada um deles. A Teoria dos Jogos vem sendo utilizada em Sistemas Multiagentes (Jennings, 1998; Ferber, 1999) que realizam simulações de mercados, principalmente, como mecanismo para coordenar a ação de agentes em situações de conflito de interesse (Krishna; Ramesh, 1998; Ferreira, 2002). Um jogo estratégico consiste basicamente de:

- Um conjunto finito S de n jogadores ($n > 1$);
- Para cada jogador $i \in S$, existe um conjunto de estratégias (ações) possíveis de serem tomadas, indicadas por A_i ;

- Para cada jogador $i \in S$, existe uma relação de preferência, indicada por $>$, definida sobre A_i .

As preferências podem ser representadas através de uma função de ganho, também denominada de função de *payoff*. A combinação das funções de *payoff* para todos os jogadores pode ser apresentada na forma de uma matriz de *payoff*. Portanto, a matriz de *payoff* possui a propriedade de apresentar todos os elementos de um jogo estratégico, razão pela qual, os jogos aparecem, normalmente, sob a forma de matrizes de *payoff*.

4 O Sistema Multiagentes Utilizado

O Sistema Multiagentes utilizado é composto basicamente pelos seguintes elementos:

- Agente Operador do Sistema (AOS): simula o comportamento do OIS do sistema.
- Agente Gerador (AG): modela o comportamento dos geradores.

O objetivo principal de um AG é obter o maior lucro possível, mas seu comportamento estratégico depende das características do mercado em que ele atua. A dinâmica do comportamento estratégico de cada agente do Sistema Multiagentes utilizado considera a existência de um mercado de energia com as seguintes características:

- Os AGs são independentes e a concorrência entre eles é considerada perfeita (são desprezados cartéis e conluíus).
- Os AGs submetem lances ao AOS; cada lance é composto pelo preço da unidade gerada e o respectivo limite de geração;
- O AOS realiza um despacho centralizado utilizando o modelo de despacho descrito em (1).

Por sua vez, os AGs apresentam comportamento estratégico baseado na seguinte sequência de ações:

- 1) Obtenção do conjunto de estratégias;
- 2) Modelagem dos concorrentes;
- 3) Determinação da melhor estratégia;
- 4) Aplicação da melhor estratégia;
- 5) Análise dos resultados.

O modelo utilizado considera que cada AG realizará um processamento independente e paralelo, composto pelas etapas acima, as quais serão detalhadas nas seções a seguir.

4.1 Obtenção do Conjunto de Estratégias

A demanda total D é considerada conhecida pelos agentes. Cada AG submete ao AOS dois lances, contendo o preço por unidade gerada (π_1 e π_2 , onde $\pi_1 < \pi_2$) e as potências ofertadas, Pg_1 e Pg_2 . Assim:

Lance 1: (π_1, Pg_1)

Lance 2: (π_2, Pg_2)

Esse procedimento é adotado porque, caso um determinado AG, na tentativa de obter um ganho maior, submetesse apenas lances de valor elevado, ele estaria sujeito a não ser despachado pelo AOS. Os valores da quantidade de energia ofertada são considerados idênticos e iguais à metade da capacidade máxima de geração (Pg_{\max}) do AG, ou seja:

$$Pg_1 = Pg_2 = Pg_{\max}/2.$$

O conjunto de estratégias S é obtido conforme proposto por Krishna (1998). Os possíveis pares de lances para o preço da energia de um AG vêm do produto cartesiano entre as triplas $T_1 = (L_1, M_1, H_1)$ e $T_2 = (L_2, M_2, H_2)$, ou seja:

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9\} = \{(L_1, L_2), (L_1, M_2), (L_1, H_2), (M_1, L_2), (M_1, M_2), (M_1, H_2), (H_1, L_2), (H_1, M_2), (H_1, H_2)\}$$

Onde, M_1 e M_2 são os custos marginais nas porções médias das partes “baixa” e “alta” da curva de custo (CC) do agente. O custo marginal em um ponto é dado pela derivada da função de custo nesse ponto. A função de custo típica de um AG é dada em (2).

$$CC(Pg) = aPg^2 + bPg + c \quad (2)$$

Onde, a , b e c são constantes do gerador. O custo marginal (CM) para um valor de geração (Pg) é dado por:

$$CM(Pg) = 2aPg + b \quad (3)$$

Assim, tomando-se os custos marginais nas partes alta e baixa da curva de custo, tem-se:

$$M_1 = 2a\left(\frac{Pg_{\max}}{4}\right) + b; \quad M_2 = 2a\left(\frac{3Pg_{\max}}{4}\right) + b \quad (4)$$

E ainda:

$$L_1 = 0,9M_1; H_1 = 1,1M_1; L_2 = 0,9M_2; H_2 = 1,1M_2 \quad (5)$$

4.2 Modelagem dos Concorrentes

Para determinar sua melhor estratégia, cada AG cria um conjunto de n agentes virtuais (AV) que simularão os comportamentos dos concorrentes. A cada AV deve ser atribuída uma curva de custo estimada e uma probabilidade, representando a fidelidade com que esta curva representa o seu concorrente.

Seja, por exemplo, um sistema composto por três AGs: $\{AG_a, AG_b, AG_c\}$. Considerando que AG_a cria n_a^b agentes virtuais para AG_b e n_a^c agentes virtuais para AG_c , tem-se o seguinte conjunto de agentes virtuais:

$$AV_a^{bi} \text{ para } i = 1, \dots, n_a^b \quad AV_a^{cj} \text{ para } j = 1, \dots, n_a^c \quad (6)$$

AV_a^{bi} e AV_a^{cj} representam, respectivamente, o i -ésimo e o j -ésimo agentes virtuais criados por AG_a para representar AG_b e AG_c . Para determinar a sua melhor estratégia, AG_a deverá simular um número total de jogos dado por: $n_a = n_a^b \cdot n_a^c$. Um **jogo específico**, no qual AG_a joga com AV_a^{bi} e AV_a^{cj} , para dados i e j , será indicado pelo índice k .

As probabilidades associadas a AV_a^{bi} e AV_a^{cj} , serão, respectivamente p_a^{bi} para $i = 1, \dots, n_a^b$ e p_a^{cj} para $j = 1, \dots, n_a^c$. A probabilidade conjunta de que o k -ésimo jogo represente a situação real de concorrência será dada por:

$$p_a^k = p_a^{bi} \cdot p_a^{cj} \text{ para } i = 1, \dots, n_a^b, j = 1, \dots, n_a^c \text{ e } k = 1, \dots, n_a \quad (7)$$

Além disso, tem-se que:

$$\sum_{k=1}^{n_a} p_a^k = 1 \quad (8)$$

Em cada jogo AG_a e cada AV_a calcularão os seus conjuntos de estratégias, de acordo com o procedimento descrito na seção anterior, com base na função de custo a ele atribuída pelo próprio AG_a . Para o exemplo acima, com 3 geradores, os conjuntos de estratégias de AG_a , AV_a^{bi} e AV_a^{cj} , que participam do k -ésimo jogo, seriam:

$$\begin{aligned} S_a &= \{S_{a,1}, S_{a,2}, S_{a,3}, S_{a,4}, S_{a,5}, S_{a,6}, S_{a,7}, S_{a,8}, S_{a,9}\} \\ S_{bi}^k &= \{S_{bi,1}^k, S_{bi,2}^k, S_{bi,3}^k, S_{bi,4}^k, S_{bi,5}^k, S_{bi,6}^k, S_{bi,7}^k, S_{bi,8}^k, S_{bi,9}^k\} \\ S_{cj}^k &= \{S_{cj,1}^k, S_{cj,2}^k, S_{cj,3}^k, S_{cj,4}^k, S_{cj,5}^k, S_{cj,6}^k, S_{cj,7}^k, S_{cj,8}^k, S_{cj,9}^k\} \end{aligned}$$

4.3 Determinação da Melhor Estratégia

Cada AG irá simular n_a jogos estratégicos não-cooperativos com os seus agentes virtuais. Para cada jogo o agente deverá analisar todas as possíveis jogadas de seus concorrentes. Assim, para um único jogo, o número de possibilidades, ou **eventos** será dado por $n_e = 9^m$, onde m corresponde ao número de agentes que participam do jogo. Para o exemplo anterior, esse conjunto de possibilidades, para o k -ésimo jogo, pode ser representado pela matriz de *payoff* mostrada na Figura 3, onde as possibilidades de lances de AG_a aparecem nas colunas e as possibilidades conjuntas para AV_a^{bi} e AV_a^{cj} aparecem nas linhas da matriz.

Para cada célula da matriz de *payoff* é realizado um despacho de mínimo custo, levando-se em consideração os lances de cada agente. O lucro l_a obtido

pele AG_a é atribuído ao valor da célula. Esse lucro é calculado por:

$$l_a(Pg_a) = Pg_a \cdot \lambda_a - CC_a(Pg_a) \quad (9)$$

	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	$S_{a,7}$	$S_{a,8}$	$S_{a,9}$
$S_{bi,1}^k S_{cj,1}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,2}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,3}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,4}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,5}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,6}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,7}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,8}^k$									
$S_{bi,1}^k S_{cj,9}^k$									
$S_{bi,2}^k S_{cj,2}^k$									
\vdots									
$S_{bi,9}^k S_{cj,1}^k$									
\vdots									
$S_{bi,9}^k S_{cj,9}^k$									

Figura 3. Exemplo de Tabela de *Payoff*

onde Pg_a é a energia total despachada por AG_a e λ_a corresponde ao valor do preço *spot*, obtido na solução do problema de despacho (1). O resultado do jogo é obtido usando-se o *critério Maximin*, e representa o lucro esperado para AG_a . Basicamente o processo é o que se segue:

1. Para cada coluna é avaliado o **menor lucro** esperado para AG_a , obtendo-se um vetor de 9 elementos, denominado **vetor de lucros mínimos esperados** no k -ésimo jogo (l_a^k).
2. A seguir, determina-se o **maior valor** presente em l_a^k . Esse valor é denominado **Valor Maximin**, será indicado por v_a^k .
3. Determina-se o número de elementos de l_a^k cujos valores são iguais ao valor Maximin. Esse valor é indicado por nv_a^k .
4. Então, a cada elemento do vetor l_a^k é associada uma probabilidade, cujo valor é zero para todos os elementos de l_a^k menores que v_a^k e $(1/nv_a^k)$ para os elementos de l_a^k iguais a v_a^k . O vetor assim obtido é denominado **vetor de distribui-**

ção de probabilidades do k -ésimo jogo (ω_a^k).

O Processo é mostrado na Figura 4 para o exemplo genérico com 3 agentes.

	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	$S_{a,7}$	$S_{a,8}$	$S_{a,9}$
$S_{bi,1}^k S_{cj,1}^k$									
\vdots									
$S_{bi,9}^k S_{cj,9}^k$									

l_a^k :	0.8	1.3	0.3	2.0	1.8	1.1	2.0	0.5	1.0
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Portanto: $v_a^k = 2.0$ e $nv_a^k = 2$ Assim:

ω_a^k :	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 4. O Processo de cálculo de ω_a^k

Finalmente, após todos os n_a jogos terem sido simulados e suas matrizes de *payoff* calculadas, pode-se obter o resultado geral de todos eles. Esse resultado é formado pelo **lucro esperado**, L_a , de AG_a e pelo **vetor de distribuição de probabilidade**, Ω_a , de todas as estratégias possíveis para AG_a . O vetor Ω_a indica a probabilidade de cada estratégia de AG_a , isto é, cada par de lances de AG_a produzir o lucro esperado L_a . O **lucro esperado** de AG_a é calculado pela expressão:

$$L_a = \sum_{k=1}^{n_a} p_a^k v_a^k \quad (10)$$

onde p_a^k é dado em 7.

O vetor de distribuição de probabilidade de todas as estratégias possíveis para AG_a é um vetor de 9 elementos, calculado conforme (11):

$$\Omega_a = \sum_{k=1}^{n_a} p_a^k \omega_a^k \quad (12)$$

Analisando-se o vetor Ω_a , pode-se escolher a melhor estratégia para AG_a . Por exemplo, caso $\Omega_a = [0.48 \ 0.48 \ 0 \ 0 \ 0.04 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, então, se AG_a lançar no mercado os pares $S_{a,1}$ e $S_{a,2}$, ele terá 48% de chances de obter o lucro esperado L_a . Se lançar o par $S_{a,5}$, terá somente em 4%.

4.4 Aplicação da Melhor Estratégia

Após analisar seus vetores Ω_a , os AGs determinam suas melhores estratégias de ação e procedem aos lances submetidos ao AOS. Os lances são forma-

dos pelos seguintes pares: (π_1, Pg_1) e (π_2, Pg_2) , com $\pi_1 < \pi_2$ determinados pela estratégia de maior $\Omega_{a,s}$, para $s = 1, \dots, 9$. Estes pares são encaminhados ao AOS que, então, realizará o despacho de mínimo custo considerando-se a demanda e os lances enviados por todos os AGs do ambiente.

4.5 Análise dos Resultados

A remuneração de cada AG é dada pelo produto do preço *spot* pelo o total de energia por ele despachada. Após a realização do despacho, o AOS envia a cada um dos AGs o valor da remuneração por eles obtida. Os AGs, então, calculam o lucro obtido tomando como base a remuneração recebida, o total de energia despachada e, ainda, a sua curva de custo.

Se o lucro obtido pelo AG, calculado conforme (9), estiver abaixo do valor esperado, o AG deverá melhorar sua estratégia de ação, repetindo as etapas de 2 a 5 (da seção 4), com novas estimativas para as curvas de custo do AVs.

5 Conclusão

Este trabalho tem por objetivo investigar os *Sistemas Multiagentes*, aliados à *Teoria dos Jogos*, na busca do comportamento estratégico que permita às empresas do setor elétrico, regulado por regras de mercado, maximizar seus lucros. Foi apresentado um modelo multiagentes para a simulação de mercados de energia. Tal modelo permite a representação dos aspectos de mercados relacionados ao sistema de transmissão, permitindo ainda, detectar situações típicas de poder mercado, geradas por congestionamentos. Os estudos de caso envolvendo o sistema descrito são apresentados em (Silva e Nepomuceno, 2007). Dentre outros aspectos, mostra-se que a estrutura de mercado *pool* com remuneração ao preço *spot* é um bom mecanismo para fomentar investimentos na melhoria da qualidade da produção na presença de sistemas de transmissão reais, isto é, sujeitos a limitações de potência máxima transferida.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP.

Referências Bibliográficas

Barroso, L. A. N. (2000). Comportamento Estratégico de Agentes Geradores em Ambiente de Mercado. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Maio, 2000

- Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems - An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, New York, 1999.
- Ferreira, W. D. (2002). Modelo Multiagentes para Determinação do Comportamento Estratégico em Mercados de Energia. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Goiás, setembro, 2002.
- Ferrero, R. W. et al. (1997). Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 12, n. 3, pp. 1340-1347, Aug. 1997.
- Jennings, N. R.; Sycara, K., Wooldridge, M. (1998). A Roadmap of Agent Research and Development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, n. 1, p. 7-38, 1998.
- Kelman, R et al. (2001). Market Power Assessment and Mitigation in Hydrothermal Systems. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 16, n. 3, pp. 354-359, Aug. 2001.
- Kelman, R. (1999). Esquemas Competitivos em Sistemas Hidroelétricos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Agosto, 1999.
- Krishna, V; Ramesh, V. C. (1998). Intelligent Agents for Negotiations in Market Games. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, pp. 1103-1113, Aug. 1988.
- Larman, C. (1998). *Applying UML and patterns: an introduction to object-oriented analysis and design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- Monticelli, A. J. (1983) “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, Edgard Blücher.
- Silva, E. L. (2001). *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2001.
- Silva, P. S.; Nepomuceno, L. (2007) *Simulação de Mercados de Energia Utilizando Teoria de Jogos e Agentes Inteligentes – Estudos de Caso*. SBAI.
- Stoft, S. (1999). Using Game Theory to Study Market Power in Simple Networks. *IEEE Tutorial on Game Theory Applications in Electric Power Market*, New York, 1999.