

# SIMULAÇÃO DE MERCADOS DE ENERGIA UTILIZANDO TEORIA DE JOGOS E AGENTES INTELIGENTES – ESTUDOS DE CASO

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**— In the context of actual deregulation in energy systems, market simulation is an important tool which provides the agents with the ability to establish a strategic behavior in the market and to evaluate the behavior of other agents. This work proposes a multi-agents system to simulate the energy markets using game theory. Due to extended content, the work is described as a two paper series. In the first one (Silva e Nepomuceno, (2007)), the market simulation model is described. One of the central features of the model is its ability to represent the transmission system. This feature provided the means to evaluate some market power situations generated due to congestion in the transmission system. In this work, the proposed model is evaluated through case studies involving only the Pool market. The results obtained allow the identification of market power in the systems studied, and show that the transmission system representation is crucial if one is interested in calculating accurate spot prices in the Pool market. This result is important since the methodology actually used to calculate the spot prices in Brazil do not take into account the transmission system representation. The results obtained also reassure that the Pool market structure using the spot price charging scheme is an efficient mechanism to promote investments in the power grid.

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

**Resumo**— No contexto atual de desregulamentação do setor elétrico 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 utiliza a Teoria de Jogos e um Sistema Multiagentes para a simulação de mercados de energia. Em função do conteúdo extenso, o trabalho é descrito em dois artigos. No primeiro (Silva e Nepomuceno, 2007), o modelo de simulação de mercado utilizado é descrito. Uma das características importantes do modelo é a possibilidade de representação do sistema de transmissão, o que propiciou a análise de situações de poder de mercado gerada por congestionamentos. Neste trabalho o modelo é avaliado em estudos de casos envolvendo o mercado *Pool*. Os resultados obtidos permitem identificar situações potenciais de poder de mercado e mostram o grande impacto que o sistema de transmissão tem sobre o mercado *Pool* remunerado ao preço *spot*. Estes resultados são importantes, já que o modelo que calcula o preço *spot* no Brasil atualmente não leva em consideração o sistema de transmissão. Os resultados confirmam que a estrutura de mercado *Pool* com remuneração ao preço *spot* é um mecanismo eficiente para fomentar investimentos na produção.

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

## 1 Introdução

O setor elétrico de diversos países, entre os quais se inclui 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 atual é possível comercializar energia em dois mercados, basicamente: *Pool* e Bilateral. No mercado bilateral, os contratos são estabelecidos entre comprador/produtor independentemente do operador do sistema. O *Pool* estabelece leilões de energia em que os agentes dão lances de compra/venda e podem ou não obter sucesso, em suas negociações, dependendo dos lances ofertados.

Nesse ambiente de informações incompletas os agentes de mercado necessitam de toda a ajuda computacional possível em seu processo de tomada de decisão (Krishna; Ramesh, 1998), o que torna fundamental o desenvolvimento de modelos e ferramentas que possam auxiliá-los no levantamento de estratégias de ação. A simulação da estrutura competitiva entre os agentes de mercados tem sido amplamente

pesquisada utilizando a Teoria de Jogos. Um levantamento dos principais trabalhos envolvendo essa linha de pesquisa é destacado em Silva e Nepomuceno (2007). Por outro lado, 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 básico investigar os Sistemas Multiagentes, aliados à Teoria dos Jogos, na busca do comportamento estratégico que permita as empresas do setor elétrico, regulado por regras de mercado, maximizar seus lucros. Neste trabalho, 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.

Devido ao volume de informações envolvidas, o trabalho é descrito em dois artigos. No primeiro, Silva e Nepomuceno (2007), o modelo de simulação de mercado multiagentes é descrito, dando ênfase no modelo de despacho adotado em que as características relacionadas ao sistema de transmissão são representadas em detalhe. Neste trabalho o modelo adotado é explorado em estudos de casos envolvendo sis-

temas teste, escolhidos de modo que características específicas de poder de mercado pudessem ser estudadas de forma simples.

O trabalho está organizado conforme se segue. Uma descrição sucinta do modelo multiagentes apresentado em Silva e Nepomuceno (2007) é realizada na Seção 2. Na Seção 3 são apresentados os estudos de caso envolvendo simulações com o modelo adotado. As conclusões gerais são fornecidas na Seção 4.

## 2 O Sistema Multiagentes Utilizado

O Sistema multiagentes utilizado é composto basicamente pelo Agente Operador do Sistema (AOS), que simula o comportamento do operador independente do sistema (OIS) e o Agente Gerador (AG), que modela o comportamento dos geradores. A dinâmica do comportamento estratégico de cada agente 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 Silva e Nepomuceno (2007). O despacho define o montante de energia que deve ser gerado por cada gerador do sistema.

Cada AG apresenta o comportamento estratégico baseado na seguinte seqüência 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. Cada etapa é matematicamente descrita em Silva e Nepomuceno (2007), sendo também descrita de forma simplificada a seguir.

### 2.1 Obtenção do Conjunto de Estratégias

Nesta etapa cada AG submete ao AOS dois lances, contendo o preço por unidade gerada ( $\pi_1$  e  $\pi_2$ , onde  $\pi_1 < \pi_2$ ) e as potências ofertadas,  $P_{g1}$  e  $P_{g2}$ . O conjunto de estratégias  $S$  é obtido pelo produto cartesiano entre as triplas  $T_1 = (L_1, M_1, H_1)$  e  $T_2 = (L_2, M_2, H_2)$ , onde  $M_1, L_1, H_1$  e  $M_2, L_2, H_2$  são valores de custos marginais típicos em determinados pontos da curva de custo de geração, conforme descrito em Silva e Nepomuceno (2007).

### 2.2 Modelagem dos Concorrentes

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

### 2.3 Determinação da Melhor Estratégia

Cada AG simula jogos estratégicos não-cooperativos com os seus AVs. Para cada jogo o agente deverá analisar todas as possíveis jogadas de seus concorrentes. Os jogos são sintetizados por matrizes de *payoff*, conforme descrito em Silva e Nepomuceno (2007). 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  $I_a^k$  obtido pelo  $AG_a$  no jogo  $k$  é calculado e atribuído ao valor da célula.

O resultado de um jogo é obtido usando-se o critério *Maximin*, e representa o lucro esperado para o  $AG_a$ . A idéia geral do critério é calcular o máximo valor associado ao menor lucro de cada decisão tomada pelo  $AG_a$ . O resultado do jogo também fornece um vetor de distribuição de probabilidades  $\omega_a^k$  associado à decisão de cada jogo  $k$ .

Após todos os jogos terem sido simulados e suas matrizes de *payoff* calculadas, obtém-se o resultado geral de todos eles, formado pelo lucro esperado  $L_a$  de  $AG_a$  e pelo vetor de distribuição de probabilidade  $\Omega_a$  de todas as estratégias possíveis para  $AG_a$ . Analisando-se o vetor  $\Omega_a$ , 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%.

### 2.4 Aplicação da Melhor Estratégia

Após analisar seus vetores  $\Omega_a$ , os AGs determinam suas melhores estratégias de ação e procedem aos lances submetidos ao AOS que realizará o despacho de mínimo custo considerando-se a demanda e os lances enviados por todos os AGs do ambiente.

### 2.5 Análise dos Resultados

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. Caso esse lucro estiver abaixo do valor esperado, o AG deverá melhorar sua estratégia de ação, repetindo as

etapas de 2 a 5 (descritas na Seção 2) com novas estimativas para as curvas de custo do AVs.

### 3 Estudos de Caso

Os estudos de caso 1 e 2, descritos a seguir são realizados utilizando o sistema teste, composto por 2 barras, 2 geradores e um circuito que deve atender uma demanda de 200MW, mostrado na Figura 5. Esse sistema teste simples foi escolhido, pois facilita a visualização de algumas características importantes de mercado.

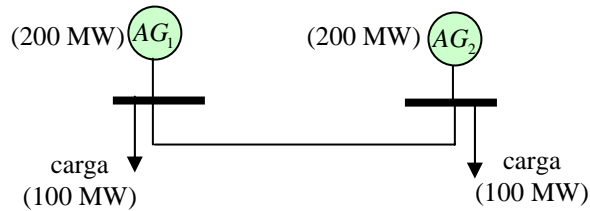


Figura 5. Sistema teste utilizado nos estudos de caso.

#### 3.1 Primeiro Estudo de Caso

Neste estudo, avaliam-se os lucros que cada agente gerador obteria em um mercado de energia de livre concorrência, na ausência de limites físicos para o sistema de transmissão. O resultado é comparado com a situação que ocorreria em um mercado verticalizado, onde o OIS possui o conhecimento exato das curvas de custo de cada agente gerador. As informações utilizadas para os agentes geradores estão mostradas nas tabelas abaixo:

Tabela 1. Base de conhecimento do  $AG_1$

	Curva de custo (\$/h)	Ger. Máxima (MW)	Probabilidade
<b>AG 1</b>	$0,005 \cdot g^2 + 10,00g$	200	-
<b>AV 2.1</b>	$0,004 \cdot g^2 + 15,00g$	200	0.6
<b>AV 2.2</b>	$0,006 \cdot g^2 + 25,00g$	200	0.4

Tabela 2. Base de conhecimento do  $AG_2$

	Curva de custo (\$/h)	Ger. Máxima (MW)	Probabilidade
<b>AG 2</b>	$0,005 \cdot g^2 + 20,00g$	200	-
<b>AV 1.1</b>	$0,003 \cdot g^2 + 5,00g$	200	0.5
<b>AV 1.2</b>	$0,008 \cdot g^2 + 15,00g$	200	0.5

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos após o despacho realizado pelo OIS para o caso do mercado verticalizado. Como era de se esperar,  $AG_1$  vende toda a sua produção (pois possui estrutura de custo menor) enquanto  $AG_2$  não é despachado. A Tabela 4 mostra os vetores de distribuição de probabilidade

das estratégias de  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$  para  $AG_1$  e  $AG_2$ , bem como os lucros esperados para ambos no mercado *spot*. A Tabela 5 mostra o despacho final calculado pelo *Pool*.

Tabela 3. Despacho do OIS para Mercado Verticalizado (Preço *Spot* = \$12,00/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	200	2200	2400	200
$AG_2$	0	0	0	0

Tabela 4. Simulações do Mercado *Spot*

AG	Comportamento Estratégico		Lucro Esperado (\$/h)
	Lances	$\Omega$	
$AG_1$	(9.45; 100) e (10.35; 100)	0	330,00
	(9.45; 100) e (11.5; 100)	0	
	(9.45; 100) e (12.65; 100)	33,33	
	(10.5; 100) e (10.35; 100)	0	
	(10.5; 100) e (11.5; 100)	0	
	(10.5; 100) e (12.65; 100)	33,33	
	(11.55; 100) e (10.35; 100)	0	
	(11.55; 100) e (11.5; 100)	0	
$AG_2$	(11.55; 100) e (12.65; 100)	33,33	0
	(18.45; 100) e (19.35; 100)	5,56	
	(18.45; 100) e (21.5; 100)	5,56	
	(18.45; 100) e (23.65; 100)	5,56	
	(20.5; 100) e (19.35; 100)	13,89	
	(20.5; 100) e (21.5; 100)	13,89	
	(20.5; 100) e (23.65; 100)	13,89	
	(22.55; 100) e (19.35; 100)	13,89	
	(22.55; 100) e (21.5; 100)	13,89	
	(22.55; 100) e (23.65; 100)	13,89	

Da Tabela 4 nota-se que também na metodologia proposta o  $AG_1$  vende toda a sua produção e o  $AG_2$  não é despachado. Estes resultados estão coerentes pois  $\Omega_2$  indica que, independentemente da estratégia adotada, o  $AG_2$  tem sempre o lucro esperado  $L_2 = 0$ ; ou seja,  $AG_2$  não seria despachado. Quanto a  $AG_1$ , seu vetor de probabilidades  $\Omega_1$  indica que as estratégias  $S_3$ ,  $S_6$  e  $S_9$  possuem a mesma probabilidade (33,33%) de produzir o lucro esperado  $L_1 = \$330/h$ . Sendo assim, o gerador opta pela estratégia com os maiores preços, ou seja,  $S_9$ , cujos preços são \$11,55/MWh e \$12,65/MWh, o que produziu o lucro real de \$200/h.

Comparando-se as Tabelas 3 e 5, nota-se que o lucro do  $AG_1$  é maior no mercado *Pool (spot)* do que em um mercado verticalizado. Isto ocorre porque no mercado verticalizado o OIS conhece os custos reais de produção de cada AG e os despacha de modo a minimizar o custo global do sistema. Já em um mercado de livre comércio, o OIS, não conhecendo

os custos reais de produção dos AGs, minimiza os custos com base nas informações fornecidas por cada AG. Se um deles informa um preço de energia muito alto, tentando obter lucro excessivo, corre o risco de não ser despachado. Nesse caso, tanto no mercado verticalizado quanto no mercado *spot*,  $AG_1$  poderia aumentar o custo de sua energia (até que seu custo marginal se equiparasse ao custo do  $AG_2$ ) que, mesmo assim, venderia toda a sua produção. Parte da demanda do sistema somente começaria a ser suprida pelo  $AG_2$  a partir do momento em que seu custo de produção fosse igual ou superior ao custo marginal de  $AG_1$ .

Tabela 5. Despacho do Mercado *Spot* (Preço *Spot* = \$12,65/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	200	2200	2530	330
$AG_2$	0	0	0	0

### 3.2 Segundo Estudo de Caso

Neste segundo caso, introduziu-se no sistema do estudo anterior um limite máximo potência para o circuito de transmissão de 50MW, e repetiram-se as avaliações. Portanto, as bases de conhecimento dos AGs são as mesmas do primeiro estudo de caso.

A Tabela 6 mostra o despacho realizado pelo OIS para o caso do mercado verticalizado. Devido ao limite de transmissão de 50MW,  $AG_1$  vende somente parte de sua capacidade de geração e  $AG_2$  também. Repara-se que, devido ao problema de congestionamento da transmissão, o preço *spot* subiu consideravelmente em relação ao caso anterior.

Tabela 6. Despacho do OIS para Mercado Verticalizado (preço *spot* = \$20,50/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	150	1612,5	3075	1462,5
$AG_2$	50	1012,5	1025	12,5

A Tabela 7 mostra os vetores de distribuição de probabilidade das estratégias de  $AG_1$  e  $AG_2$ , bem como os lucros esperados para ambos no mercado *spot*. Como pode ser observado da Tabela 8, também nesse mercado  $AG_2$  é despachado e  $AG_1$  vende somente parte de sua capacidade de produção. A distribuição  $\Omega_1$  indica que devido ao limite na linha de transmissão, todas as estratégias possíveis de serem adotadas por  $AG_1$  têm a mesma probabilidade de produzir o lucro esperado  $L_2 = \$1017,3/h$ .

A distribuição  $\Omega_2$  indica que a melhor estratégia do  $AG_2$  seria  $S_9$ , produzindo um lucro esperado

$L_2 = \$115/h$ . O fato de a probabilidade de  $S_9$  ser 100% explica-se porque, agora, devido ao limite do sistema de transmissão, o OIS é “obrigado” a comprar energia de  $AG_2$  que, então, para maximizar os seus lucros, lança no mercado sua estratégia de maior preço. Assim, em função do congestionamento na transmissão, este agente passa a ter poder de mercado.

Tabela 7. Simulações do Mercado *Spot*

AG	Comportamento Estratégico		Lucro Esperado (\$/h)
	Lances	$\Omega$	
$AG_1$	(9.45; 100) e (10.35; 100)	11,11	1017,3
	(9.45; 100) e (11.5; 100)	11,11	
	(9.45; 100) e (12.65; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (10.35; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (11.5; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (12.65; 100)	11,11	
	(11.55; 100) e (10.35; 100)	11,11	
	(11.55; 100) e (11.5; 100)	11,11	
$AG_2$	(18.45; 100) e (19.35; 100)	0	115
	(18.45; 100) e (21.5; 100)	0	
	(18.45; 100) e (23.65; 100)	0	
	(20.5; 100) e (19.35; 100)	0	
	(20.5; 100) e (21.5; 100)	0	
	(20.5; 100) e (23.65; 100)	0	
	(22.55; 100) e (19.35; 100)	0	
	(22.55; 100) e (21.5; 100)	0	
	(22.55; 100) e (23.65; 100)	100	

Tabela 8. Despacho do Mercado *Spot* (Preço *Spot* = \$22,55/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	150	1612,5	3382,5	1770
$AG_2$	50	1012,5	1127,5	115

Nota-se, entretanto, que embora  $AG_2$  tenha poder de mercado,  $AG_1$  foi o maior beneficiado, com um lucro de \$1770/h contra \$330/h do Caso 1. Ocorre que no *Pool* todos os geradores são remunerados ao mesmo preço *spot*. Então, devido ao fato de  $AG_2$  ter elevado o preço da energia, ambos se beneficiam. Assim, uma produção que, no mercado verticalizado, custaria ao OIS (e, portanto, aos consumidores finais), \$2400/h passou a custar \$4100/h em função das limitações no sistema de transmissão. Esse cenário é um indicativo de que maiores investimento deveriam ser feitos na expansão/melhoria do sistema de transmissão.

Comparando as Tabelas 7 e 8, verifica-se que o lucro esperado pelo  $AG_2$  foi exatamente igual ao lucro realizado. Já para o  $AG_1$ , o lucro realizado acabou ficando acima do que era esperado por ele. Isso é um forte indicativo de que os agentes virtuais

utilizados para calcular o lucro esperado (base de conhecimento deste agente) não foram bem estimados pelo  $AG_1$ . Estudos de pesquisa futuros são necessários no sentido de identificar melhores estratégias de representação dos agentes virtuais.

No *Pool*, um modo de  $AG_2$  aumentar o seu lucro e colaborar para reduzir o preço *spot* seria investir na redução de seus custos de produção para ganhar mercado, reduzindo a participação de  $AG_1$ . No caso a seguir, supõe-se que o  $AG_2$  fez investimentos para reduzir seus custos, igualando-os aos custos do  $AG_1$ . Os resultados são mostrados nas Tabelas 9 e 10. Neste caso, a demanda total se divide igualmente entre os dois geradores e o preço *spot* é consideravelmente reduzido para \$11,55/MWh, o que é muito benéfico para o consumidor. O lucro de  $AG_1$  se reduziu a \$105/h e o lucro de  $AG_2$  acabou também reduzindo. Apesar de ter reduzido seus custos,  $AG_2$  acabou tendo um lucro menor. Isso aconteceu em função da limitação da transmissão. Com uma transmissão bem dimensionada, espera-se que a redução de custos de produção de um agente produza um aumento em seu despacho e em seus lucros realizados.

Tabela 9. Simulações do Mercado *Spot*

AG	Comportamento Estratégico		Lucro Esperado (\$/h)
	Lances	%	
$AG_1$	(9.45; 100) e (10.35; 100)	11,11	1017,3
	(9.45; 100) e (11.5; 100)	11,11	
	(9.45; 100) e (12.65; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (10.35; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (11.5; 100)	11,11	
	(10.5; 100) e (12.65; 100)	11,11	
	(11.55; 100) e (10.35; 100)	11,11	
	(11.55; 100) e (11.5; 100)	11,11	
$AG_2$	(9.45; 100) e (10.35; 100)	5,56	292,75
	(9.45; 100) e (11.5; 100)	5,56	
	(9.45; 100) e (12.65; 100)	5,56	
	(10.5; 100) e (10.35; 100)	5,56	
	(10.5; 100) e (11.5; 100)	5,56	
	(10.5; 100) e (12.65; 100)	5,56	
	(11.55; 100) e (10.35; 100)	5,56	
	(11.55; 100) e (11.5; 100)	5,56	
	(11.55; 100) e (12.65; 100)	5,56	

Tabela 10. Despacho do Mercado *Spot* (Preço *Spot* = \$11,55/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	100	1050	1155	105
$AG_2$	100	1050	1155	105

### 3.2 Terceiro Estudo de Caso

Neste estudo utiliza-se o sistema-teste de 30 barras do IEEE (IEEE, 2006), com 3 geradores alimentando uma demanda total de 283,4 MW. Os limites de transmissão foram liberados. A base de conhecimento dos AGs é mostrada nas tabelas 13 a 15.

Tabela 13. Base de conhecimento do  $AG_1$

	Curva de custo (\$/h)	Ger. Máxima (MW)	Probabilidade
<b>AG 1</b>	$0,030 \cdot g^2 + 3,000g$	200	-
<b>AV 2.1</b>	$0,010 \cdot g^2 + 5,500g$	250	0.6
<b>AV 2.2</b>	$0,010 \cdot g^2 + 2,500g$	250	0.4
<b>AV 3.1</b>	$0,015 \cdot g^2 + 4,800g$	150	0.7
<b>AV 3.1</b>	$0,010 \cdot g^2 + 3,000g$	150	0.3

Tabela 14. Base de conhecimento do  $AG_2$

	Curva de custo (\$/h)	Ger. Máxima (MW)	Probabilidade
<b>AG 2</b>	$0,002 \cdot g^2 + 4,000g$	250	-
<b>AV 1.1</b>	$0,020 \cdot g^2 + 3,500g$	200	0.5
<b>AV 1.2</b>	$0,040 \cdot g^2 + 2,000g$	200	0.5
<b>AV 3.1</b>	$0,010 \cdot g^2 + 4,500g$	150	0.9
<b>AV 3.1</b>	$0,015 \cdot g^2 + 3,000g$	150	0.1

Tabela 15. Base de conhecimento do  $AG_3$

	Curva de custo (\$/h)	Ger. Máxima (MW)	Probabilidade
<b>AG 3</b>	$0,030 \cdot g^2 + 3,000g$	140	-
<b>AV 1.1</b>	$0,020 \cdot g^2 + 4,000g$	200	0.7
<b>AV 1.2</b>	$0,030 \cdot g^2 + 2,500g$	200	0.3
<b>AV 2.1</b>	$0,002 \cdot g^2 + 4,000g$	250	0.8
<b>AV 2.1</b>	$0,003 \cdot g^2 + 3,000g$	250	0.2

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos após o despacho realizado pelo OIS para o caso do mercado verticalizado.

Tabela 16. Despacho do OIS para Mercado Verticalizado (Preço *Spot* = \$4,88/MWh)

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	31,38	123,66	153,20	29,54
$AG_2$	220,65	979,96	1077,30	97,37
$AG_3$	31,38	123,66	153,20	29,54

O despacho obtido para o *Pool* é fornecido na Tabela 17. A Tabela 18 mostra os vetores de distribuição de probabilidade das estratégias de cada AG, bem como seus lucros esperados. Nota-se que os lucros reais de  $AG_2$  e  $AG_3$  foram acima dos valores esperados, o que indica que as estratégias utilizadas

por eles foram adequadas. No entanto, o mesmo não ocorreu com  $AG_1$ .

Tabela 17. Despacho do Mercado Spot (Preço  $spot = \$5,25/MW$ )

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	0	0	0	0
$AG_2$	250	1125,00	1312,50	187,50
$AG_3$	33,40	133,67	175,35	41,68

Tabela 18. Simulação do Mercado Spot

AG	Comportamento Estratégico		Lucro Esperado (\$/h)
	Lances	$\Omega$	
$AG_1$	(5,40; 100) e (10,80 100)	0	36,56
	(5,40; 100) e (12,00 100)	0	
	(5,40; 100) e (13,20 100)	0	
	(6,00; 100) e (10,80 100)	6,67	
	(6,00; 100) e (12,00 100)	6,67	
	(6,00; 100) e (13,20 100)	6,67	
	(6,60; 100) e (10,80 100)	26,67	
	(6,60; 100) e (12,00 100)	26,67	
$AG_2$	(3,83; 125) e (4,28 125)	0	127,96
	(3,83; 125) e (4,75 125)	0	
	(3,83; 125) e (5,23 125)	33,33	
	(4,25; 125) e (4,28 125)	0	
	(4,25; 125) e (4,75 125)	0	
	(4,25; 125) e (5,23 125)	33,33	
	(4,68; 125) e (4,28 125)	0	
	(4,68; 125) e (4,75 125)	0	
$AG_3$	(4,73; 75) e (8,78 75)	2,00	30,63
	(4,73; 75) e (9,75 75)	2,00	
	(4,73; 75) e (10,73 75)	2,00	
	(5,25; 75) e (8,78 75)	27,33	
	(5,25; 75) e (9,75 75)	27,33	
	(5,25; 75) e (10,73 75)	27,22	
	(5,78; 75) e (8,78 75)	4,00	
	(5,78; 75) e (9,75 75)	4,00	
	(5,78; 75) e (10,73 75)	4,00	

No caso a seguir,  $AG_1$  decidiu investir em seu processo produtivo e conseguiu reduzir seus custos de geração para a curva  $0,010 \cdot g^2 + 3,000g$ . A Tabela 19 mostra o despacho realizado pelo OIS para o *Po-ol*. Repara-se que  $AG_1$  contribuiu para reduzir ligeiramente o preço *spot* para \$5,23/MWh.

Tabela 19. Despacho do Mercado Spot (Preço  $Spot = \$5,23/MWh$ )

AG	Geração (MW)	Custo (\$/h)	Receita (\$/h)	Lucro (\$/h)
$AG_1$	100	400	522,5	122,5
$AG_2$	189,4	800,87	958,27	157,39
$AG_3$	0	0	0	0

Além disso, o  $AG_1$ , que não conseguiu ser despacho no caso anterior, conseguiu tomar dos outros agentes um mercado de 100 MW. Assim, minimizando seus custos de produção, o  $AG_1$  conseguiu aumentar seu mercado, e obter lucros muito maiores. Isso é exatamente o que se espera que aconteça em uma economia de mercado em que não haja nenhum tipo de poder de mercado. Nessa economia “ideal”, os agentes são encorajados a reduzir seus custos para ganhar mercado e essa concorrência deve gerar preços mais baixos para o consumidor final.

A Tabela 20 mostra os vetores de distribuição de probabilidade das estratégias de cada AG, bem como seus lucros esperados. Nota-se que  $AG_2$  e  $AG_3$  mantiveram a estratégia do caso anterior, já que não possuem informações atualizadas sobre os investimentos feitos por  $AG_1$ . Assim, as expectativas de  $AG_2$  e  $AG_3$  são as mesmas do caso anterior. Repara-se que essas expectativas não se concretizam, pois  $AG_2$  e  $AG_3$  são surpreendidos pelo despacho realizado (Tabela 19), em que suas gerações são razoavelmente reduzidas. A partir desse resultado, eles podem inferir que deve ter havido diminuição nos custos de  $AG_1$ . Assim, nas próximas simulações,  $AG_2$  e  $AG_3$  devem atualizar sua representação do  $AG_1$  para se adequar a esta nova situação.

Tabela 20. Simulação do Mercado Spot

AG	Comportamento Estratégico		Lucro Esperado (\$/h)
	Lances	$\Omega$	
$AG_1$	(3,6; 100) e (5,4; 100)	7,00	173,28
	(3,6; 100) e (6; 100)	17,00	
	(3,6; 100) e (6,6; 100)	4,67	
	(4; 100) e (5,4; 100)	7,00	
	(4; 100) e (6; 100)	17,00	
	(4; 100) e (6,6; 100)	4,67	
	(4,4; 100) e (5,4; 100)	11,00	
	(4,4; 100) e (6; 100)	21,67	
	(4,4; 100) e (6,6; 100)	8,67	
	$AG_2$	(3,83; 125) e (4,28 125)	
(3,83; 125) e (4,75 125)		0	
(3,83; 125) e (5,23 125)		33,33	
(4,25; 125) e (4,28 125)		0	
(4,25; 125) e (4,75 125)		0	
(4,25; 125) e (5,23 125)		33,33	
(4,68; 125) e (4,28 125)		0	
(4,68; 125) e (4,75 125)		0	
$AG_3$	(4,73; 75) e (8,78 75)	2,00	30,63
	(4,73; 75) e (9,75 75)	2,00	
	(4,73; 75) e (10,73 75)	2,00	
	(5,25; 75) e (8,78 75)	27,33	
	(5,25; 75) e (9,75 75)	27,33	
	(5,25; 75) e (10,73 75)	27,33	
	(5,78; 75) e (8,78 75)	4,00	
	(5,78; 75) e (9,75 75)	4,00	
(5,78; 75) e (10,73 75)	4,00		

## 6 Conclusão

Este trabalho utiliza um sistema multiagentes para a simulação de mercados de energia. Na primeira parte do trabalho (Silva e Nepomuceno, 2007) o modelo utilizado é descrito matematicamente; Neste trabalho são descritos estudos de caso envolvendo o modelo. Os resultados dos estudos mostram que em um mercado *Pool* remunerado ao preço *spot*, na presença de limites de fluxo no sistema de transmissão, um produtor de energia pode aumentar seus lucros, mesmo que, devido à topologia do sistema, outro produtor detenha o poder de mercado. No entanto, esse aumento se dará à custa de uma energia mais cara para o consumidor.

Por outro lado, um agente gerador poderá aumentar o seu lucro, e colaborar para reduzir o preço *spot* do mercado, se investir na qualidade de sua produção, reduzindo custos de geração, para ganhar mercado, e reduzindo a participação dos demais geradores no atendimento da demanda total. A melhor estratégia para todos os geradores seria ter custos de produção idênticos. Assim, a busca pela melhoria de um produtor forçaria os demais a acompanhá-lo nos investimentos, para não perderem mercado.

Os resultados obtidos destacam o grande impacto que o sistema de transmissão sobre o mercado *Pool* remunerado ao preço *spot*. É conveniente lembrar que o modelo brasileiro não leva em consideração os congestionamentos de transmissão para o cálculo de seu preço *spot*. Verificou-se ainda que, de fato, 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.

Um trabalho futuro importante consiste no estudo de metodologias para avaliarem-se as curvas de custo de produção dos concorrentes e a atribuição de sua probabilidade de ocorrência.

## Agradecimentos

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

## Referências Bibliográficas

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.

IEEE (2006). Power Systems Test Case Archive. Disponível em <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/> . Acessado em março de 2006.

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.

Silva, P. S.; Nepomuceno (2007). *Simulação de Mercados de Energia Utilizando Teoria de Jogos e Agentes Inteligentes - Descrição do Modelo*, SBAI.