

ATRIBUIÇÃO DE CENÁRIOS PARA AVALIAÇÕES DE ESTRATÉGIAS EM LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

Fernando C. Munhoz^{1,2}
DE/FEM/Unicamp

Tiago B. Correia¹
DE/FEM/Unicamp

Paulo B. Correia
DE/FEM/Unicamp

Resumo

A reforma do setor elétrico brasileiro instituiu a concorrência nos setores de geração e comercialização de energia elétrica. A energia elétrica, então, passou a ser negociada através de contratos em um modelo misto com a presença de agentes privados e estatais. Existem dois tipos de mercados para os contratos de energia: o bilateral e o *spot*. O foco deste trabalho está no mercado bilateral. No Brasil, leilões estão sendo utilizados para negociar contratos bilaterais. O objetivo deste trabalho é analisar através de cenários e da teoria do portfólio em quais contratos uma empresa geradora de energia deve alocar seus lances no leilão de venda de energia elétrica organizado pelo Mercado Atacadista de Energia (MAE) para maximizar sua utilidade esperada. Esta análise abrange também o risco e o retorno esperado. O trabalho aqui descrito é conduzido do ponto de vista de um vendedor e descreve estratégias de lances desenvolvidas para um leilão duplo com participantes identificados. O resultado do modelo é estabelecido através de uma alocação ótima de lances por parte dos vendedores minimizando o risco dado uma taxa de retorno fixada. O modelo atribui probabilidades para cada cenário e utiliza técnicas de otimização com o emprego de programação quadrática para encontrar a solução do problema.

Palavras-chave: leilão de venda de energia elétrica, teoria dos jogos, teoria do portfólio.

1. Introdução

Após o processo de reestruturação do sistema elétrico brasileiro foi criado um mercado concorrencial com a presença de agentes privados e estatais que competem por contratos de energia. Atualmente, no mercado brasileiro, esta energia pode ser comercializada através de contratos bilaterais ou no mercado *spot*.

As negociações bilaterais podem ocorrer entre geradores, distribuidores, comercializadores e consumidores livres, onde os preços e as condições são determinados livremente entre as partes ou através de leilões. O mercado *spot* abrange a parcela não contratada de energia, podendo ser originária dos excedentes das geradoras ou da demanda acima da contratada dos comercializadores e distribuidores.

Atualmente existem três formas de um agente vendedor negociar seus contratos bilaterais de energia através de leilões. Dois deles são organizados pelo Mercado Atacadista de Energia (MAE):

¹ “Bolsista do CNPq – Brasil”.

² Endereço: Unicamp – FEM – DE, Bloco I, Sala IE 301, Cx. Postal: 6122, CEP: 13083-970, Campinas-SP, Brasil. Fone: (19) 3788-3285 - Fax: (19) 3289-3722. E-mail: fcogli@fem.unicamp.br.

o leilão de venda e de compra. O terceiro é organizado por agentes de mercado interessados em comprar ou vender energia elétrica. Todos estes leilões se caracterizam por serem duplos e com participantes identificados.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de estratégias para um agente vendedor negociar contratos bilaterais no leilão de venda do MAE. Para isso, o leilão é analisado como um jogo estratégico (Fudenberg e Tirole, 1998) e os conceitos da teoria do portfólio (Elton e Gruber, 1981) são empregados. O resultado do modelo é estabelecido através de uma alocação ótima de lances por parte do vendedor, nos diversos produtos (contratos de energia) disponíveis, minimizando o risco dado uma taxa de retorno fixada.

Dentre as pesquisas realizadas para o estudo de modelos e estratégias de lances em leilões de energia, Song, Liu e Lawarrée (2002) analisam estratégias de lances para geradores em leilões simultâneos. Ferrero, Shahidehpour e Ramesh (1997) utilizam a teoria dos jogos para simular o processo de decisão para definição de ofertas de preços em mercados desregulados. Moitre (2002) analisa o comportamento econômico de geradores quando realizam suas ofertas de lances no mercado de curto prazo.

Para o desenvolvimento deste modelo são utilizados cenários. O modelo atribui probabilidades para cada cenário e utiliza técnicas de otimização com o emprego de programação não-linear quadrática (Luenberger, 1984) para encontrar a solução do problema.

2. Leilão de venda

Leilões estão sendo utilizados no Brasil para negociar contratos bilaterais de energia elétrica. Segundo Klemperer (2000), leilões são mecanismos dinâmicos e eficientes utilizados para comercializar bens em mercados complexos, principalmente quando não existe uma referência estável de preço. Para Wolfstetter (1999), essencialmente, leilões são utilizados por três razões: velocidade de venda, para revelar informação sobre as avaliações dos compradores e vendedores e, para tornar transparente a negociação prevenindo desonestidades.

O leilão de venda de energia elétrica tem como objetivo a oferta, por parte dos vendedores, de lotes de energia no valor de 0,5 MW-médio, proveniente da liberação da parcela de 25% dos contratos iniciais. O primeiro leilão foi realizado em 2002 e mais três estão previstos para 2003, 2004 e 2005, respectivamente. Os lotes de energia negociados no leilão são disponibilizados para os compradores a partir do primeiro dia do ano subsequente à realização do leilão.

O leilão de venda, apresentado na Figura 1, se caracteriza por ser duplo e com participantes identificados. Neste leilão a energia é considerada um produto homogêneo, que não permite diferenciação, e os produtos são negociados através de contratos multilaterais. Contratos multilaterais ocorrem quando a formatação do leilão possibilita a negociação entre vários compradores e vários vendedores. Neste caso um contrato multilateral pode ser quebrado em múltiplos contratos bilaterais.

Este leilão possui dois estágios. No primeiro estágio cada vendedor oferece suas ofertas para os diversos compradores em um envelope fechado que só será aberto no início do leilão. Estas ofertas são feitas através de produtos. As características dos produtos que o vendedor pode disponibilizar para negociação estão descritas a seguir (MAE, 2002).

- Nome do vendedor;
- Quantidade de lotes;
- Submercado de entrega da energia;
- Preço de reserva;
- Prazo de duração do contrato;
- Potência mínima e máxima associada a cada lote.

O vendedor pode especificar para cada produto até cinco preços de reserva R_j com uma quantidade de lotes associado. Este preço é o valor mínimo na qual o vendedor está disposto a

negociar sua energia. Este valor é de conhecimento privado do vendedor e só é tornado público durante o andamento do segundo estágio do leilão. Ademais, este valor associado com a quantidade de lotes forma a curva de oferta do vendedor para o produto, conforme mostra a Figura 2.

Os compradores participam no segundo estágio do leilão. Neste estágio o leilão é aberto com preços ascendentes. Os compradores apenas oferecem lances de quantidade de energia e podem escolher em quais produtos ele deseja efetuar lances.

O segundo estágio do leilão começa com os compradores dando lances ao preço inicial que é dado pelo primeiro preço de reserva R_1 do vendedor para o produto. No início do leilão o primeiro preço de reserva R_1 é igual ao preço corrente P_c e igual ao preço de lance P_l , apresentado na Figura 3. A partir do momento que a quantidade Q_1 , requerida pelos compradores ao preço R_1 , vai sendo atendida o leiloeiro especifica um novo preço de lance P_l , conforme Figura 4.

Existe uma ordem de classificação para os lances feitos para o mesmo produto. Por exemplo, na Figura 3 os compradores C_1 , C_2 e C_3 efetuaram lances. Entretanto, o comprador C_1 realizou seu lance antes de C_2 e C_3 . Portanto, ele terá preferência de compra de energia quando o P_l aumenta. O P_l é o valor na qual os compradores dão lances para um produto no leilão. O P_c é o preço de fechamento do leilão. A diferença entre P_l e P_c é conhecida como incremento. Este valor é fixado pelo leiloeiro.

Continuando o leilão, a Figura 4 mostra que houve um aumento do valor de P_l e o comprador C_4 efetuou um lance neste novo valor. Como os compradores C_1 e C_2 efetuaram seus lances antes de C_3 , seus lances permanecem ativos, enquanto o lance de C_3 foi excluído do leilão. Se o leilão terminasse conforme mostra a Figura 4 estariam comprando energia deste produto os compradores C_4 , C_1 e C_2 , ao preço P_c .

A Figura 5 mostra que os vendedores C_5 e C_3 efetuaram lances no valor P_l . Portanto, os lances de C_1 e C_2 foram excluídos do leilão. Neste instante, este produto está sendo vendido para os compradores C_4 , C_5 e C_3 ao preço $P_c = P_l$. O leiloeiro fixa então um novo valor para P_l e o comprador C_1 realiza um lance, conforme Figura 6.

Os compradores C_2 e C_3 , conforme mostra a Figura 7, efetuam lances no valor de P_l e os lances de C_4 e C_5 são excluídos do leilão. Neste momento o preço de fechamento do leilão P_c se iguala a P_l . Além disto, estes preços são iguais ao segundo preço de reserva do vendedor para este produto R_2 . Como a quantidade Q_1 foi demandada, a partir de R_2 a quantidade de energia ofertada pelo vendedor para este produto aumenta para Q_2 . A Figura 8 mostra o lance do comprador C_4 considerando que a quantidade de energia do produto para R_2 é Q_2 .

Se nenhum comprador efetuar mais lances, este produto é negociado entre o vendedor e os compradores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , ao preço P_c , que neste caso está igual a P_l e R_2 .

Cada comprador pode fazer lances em até 70% do total da quantidade ofertada pelos vendedores para produtos com mais de 100 lotes. Para produtos com oferta inferior a 100 lotes não existe esta restrição. Também não existe um tempo fixado para a finalização do leilão. Ele não pode ser encerrado antes de no mínimo 2 horas, mas após este período o leiloeiro pode encerrar o leilão a qualquer momento decretando um horário para encerramento com antecedência mínima de 30 minutos.

3. Teoria dos jogos e portfólio

A teoria dos jogos é um conjunto de ferramentas analíticas projetadas para ajudar a entender o fenômeno que observamos quando tomadores de decisão interagem. A suposição básica em que se apóia a teoria é que os tomadores de decisão adotam objetivos exógenos bem definidos (eles são racionais) e levam em conta seus conhecimentos e suas expectativas em relação ao comportamento dos outros tomadores de decisão (eles pensam estrategicamente) (Osborne e Rubinstein, 1994).

Heap e Varoufakis (1995) definiram um jogo como qualquer interação entre agentes que é governado por um conjunto de regras especificando os possíveis movimentos para cada participante e um conjunto de resultados para cada combinação possível de movimentos.

Os principais elementos de um jogo são: os jogadores, as ações, as estratégias e as informações disponíveis para cada jogador, os benefícios, o *payoff* e o equilíbrio do jogo, além da natureza. Estratégia é um tipo de comportamento que um jogador pode utilizar no jogo. Ele terá n tipos de estratégias se puder escolher n tipos de comportamento.

Existem dois tipos de jogos: o cooperativo e o não-cooperativo. Neste trabalho é utilizado o jogo não-cooperativo. A essência de um jogo não-cooperativo está na interdependência estratégica: o simultâneo (estratégicos) e o seqüencial (dinâmico). Na primeira, os jogadores agem ao mesmo tempo e na segunda, os jogadores movem-se em seqüência, estando cada um deles consciente das ações anteriores dos outros.

O leilão de venda descrito na seção anterior se constitui em um jogo estratégico para os vendedores e em um jogo dinâmico para os compradores. Como o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de estratégias para um vendedor de energia elétrica fixar lances, o leilão de venda será analisado como um jogo estratégico.

Em jogos estratégicos cada jogador toma a sua decisão e joga a sua estratégia uma única vez, simultaneamente com as ações tomadas pelos outros jogadores. Embora os jogadores ajam ao mesmo tempo, ignorando as ações simultâneas dos outros, cada um deles deve estar consciente de que existem outros jogadores que, por sua vez, estão simultaneamente conscientes, e assim por diante. Um jogador deve tomar suas decisões raciocinando no que o outro jogador pensa sobre a decisão que ele irá tomar. Por conseguinte, cada qual deverá colocar-se lugar dos outros e tentar calcular o resultado.

A metodologia desenvolvida para o jogo estratégico utiliza os conceitos da teoria do portfólio que investiga a formação de carteiras de contratos tendo por objetivo principal maximizar a utilidade do investidor pela relação risco e retorno.

Essa teoria, em essência, expõe que o risco de um contrato deve ser avaliado a partir de sua contribuição ao risco total de um portfólio de contratos e não de maneira isolada (Neto, 2001). O modelo do portfólio sugere que parte do risco de um contrato pode ser eliminado pela diversificação. Ela orienta que um investimento deve ser avaliado pela sua contribuição aos resultados de risco e retorno produzido por uma ampla (diversificada) carteira de contratos.

O risco é representado pela medida estatística do desvio padrão, indicando se o valor médio (retorno esperado) é representativo do comportamento observado. Assim, ao se tomarem decisões de investimento com base em um resultado médio esperado, o desvio padrão passa a revelar o risco da operação, ou seja, a dispersão do retorno em relação à média. A covariância é a medida estatística que expõe como os contratos se correlacionam entre si. A mensuração do risco de fixar lances no leilão de venda processa-se por meio de critério probabilístico, o qual consiste em atribuir probabilidades subjetivas a diferentes cenários.

4. Implementação do modelo

A metodologia desenvolvida nesta seção consiste em encontrar um portfólio ótimo para um agente vendedor fixar seus lances no leilão de venda, dado um retorno que ele deseja obter, minimizando seu risco. Para a implementação deste modelo foram utilizados cenários.

A construção de cenários deve levar em conta o caráter estratégico do jogo. O vendedor pode definir vários cenários dependendo da precisão que ele deseja obter com o modelo e das informações que ele possui do mercado e das suas crenças a respeito das informações que os outros jogadores possuem.

A construção de cenários deve considerar as ações passadas, presentes e futuras, procurando associar variáveis que podem interferir na sua concepção. No caso da comercialização de contratos de energia estas variáveis podem ser: variação da oferta e demanda do sistema interligado e de cada submercado, projeção do preço *spot*, aversão ao risco dos agentes de mercado, risco regulatório, entre outros.

Os dados que o vendedor deve entrar no modelo são: a probabilidade de ocorrer cada cenário, o retorno previsto por produto dado cada cenário e o retorno desejado pelo vendedor para o leilão. Os

dados de saída do modelo são: porcentagem do total de lotes de energia a ser ofertado em cada produto e o risco deste portfólio.

A formulação da metodologia para o agente vendedor fixar estratégias no leilão de venda foi realizada utilizando técnicas de otimização com o emprego de programação quadrática. A utilização de um modelo de otimização foi realizado pela facilidade que este possui em inserir e retirar restrições da formulação, permitindo um modelo mais flexível.

Programação quadrática é o nome dado para a classe de modelos na qual a função objetivo é uma função quadrática e as restrições são lineares. Portanto, na função objetivo é permitido ter termos que são produtos de duas variáveis tais como x^2 ou $x.y$. Programação quadrática é computacionalmente atraente porque os algoritmos de programação linear podem ser aplicados para este tipo de programação com pequenas modificações por causa da primeira derivada de uma função quadrática ser uma função linear. A formulação do modelo encontra-se abaixo.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j \sigma_{i,j} \\
 & \text{s.a.} \sum_{i=1}^n W_i \bar{R}_i = \bar{R} \\
 & \sum_{i=1}^n W_i = 1 \\
 & 0 \leq W_i \leq Lm_i \quad i = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde:

- W_i porcentagem de lotes alocado em cada produto i ;
- $\sigma_{i,j}$ covariância entre os produtos i e j ;
- $\bar{R}_i$ retorno esperado do produto i ;
- $\bar{R}$ retorno do leilão desejado pelo vendedor;
- Lm_i alocação máxima de lotes em cada produto i ;
- n número de produtos i que compõe o leilão.

A função objetivo deste modelo é minimizar o risco do portfólio de produtos dado um retorno fixado por um vendedor. A primeira restrição impõe que a porcentagem de lotes de energia a ser alocado em cada produto multiplicado pelo retorno de cada produto seja igual ao retorno fixado pelo vendedor para o leilão. A segunda restrição impõe que o somatório da porcentagem de lotes alocados nos produtos seja igual a um. A terceira restrição restringe a quantidade de lotes por produto a um valor que varia entre zero até um valor máximo definido pelo vendedor.

5. Estudo de caso

Para testar o modelo proposto na seção anterior é realizado um estudo de caso. Este estudo leva em conta três cenários, cuja definição é apresentada na Tabela 1, um vendedor V_j que tem toda sua produção de energia elétrica localizada no submercado Nordeste (NE), e doze tipos de produtos, cujas características encontram expostas Tabela 2.

A finalidade dos cenários é identificar ameaças e oportunidades originadas de mudanças no contexto, ajudar na elaboração do plano estratégico das negociações e ajudar a tomada de decisão para formulação de objetivos e estratégias. Para este estudo de caso um vendedor V_j assume os cenários descritos na Tabela 1, que considera a contestação dos mercados pelos jogadores.

Tabela 1. Cenários definidos por V_j .

Cenário	Descrição
1	V_j não submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores não submetem lances no submercado de V_j .
2	V_j submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores não submetem lances no submercado de V_j .
3	V_j submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores submetem lances no submercado de V_j .

O submercado onde V_j está localizado é o Nordeste, portanto os produtos do leilão que se refere ao seu mercado são os 1, 2 e 3. A tabela 2 apresenta como foram numerados os produtos do leilão para este estudo de caso.

Tabela 2. Especificação dos produtos.

Produto	Submercado	Prazo de duração
1	Nordeste	2 anos
2	Nordeste	4 anos
3	Nordeste	6 anos
4	Norte	2 anos
5	Norte	4 anos
6	Norte	6 anos
7	Sudeste	2 anos
8	Sudeste	4 anos
9	Sudeste	6 anos
10	Sul	2 anos
11	Sul	4 anos
12	Sul	6 anos

O vendedor V_j deve entrar com os dados referentes à probabilidade de ocorrência de cada cenário. Além disso, V_j deve definir qual a taxa de retorno que ele deseja obter para cada produto dado a verificação de um cenário. Estes valores são subjetivos, porém existem mecanismos para fornecer informações à V_j que leve a uma melhor estimativa da taxa de retorno para cada produto como: projeção do preço *spot*, previsão de entrada de novos empreendimentos de geração, análise da oferta e demanda de cada submercado entre outros. A Tabela 3 apresenta os dados de entrada do modelo definidos por V_j .

Tabela 3. Dados de entrada do leilão de venda.

Cenário	Prob.	Produtos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	30%	9%	13%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	20%	5%	9%	10%	20%	21%	25%	22%	24%	27%	21%	13%	28%
3	50%	7%	6%	7%	17%	18%	20%	20%	21%	22%	19%	21%	21%

Como pode ser observado na Tabela 3 V_j fixou taxas de retorno menores para produtos de curto prazo, enquanto que para os produtos de longo prazo ele optou por fixar taxas de retorno maiores. Ele também fixou taxas de retorno elevadas em seu submercado quando ocorre o cenário 1 e taxas de retorno reduzidas quando ocorre o cenário 3. As taxas de retorno fixada para os lances em outros submercados nos cenários 2 e 3 também são elevadas.

A determinação destas taxas leva em conta a exposição ao risco que o vendedor está disposto enfrentar. Por exemplo, um vendedor mais avesso ao risco fixaria pequenas taxas de retorno para os lances efetuados em seu submercado, de forma a garantir seu mercado, e altas taxas de retorno para lances realizados fora de seu submercado, devido ao risco que ele fica exposto com a volatilidade do valor do preço *spot*.

O retorno esperado $\bar{R}_i$ para cada produto é calculado através da média ponderada do retorno do produto para cada cenário. O desvio-padrão σ_i é calculado comparando a dispersão da rentabilidade desejada de cada produto para cada cenário com a média ponderada do retorno do produto para cada cenário. Estes valores são encontrados através das equações 2 e 3.

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^m P_k R_k \quad (2)$$

$$\sigma_i = \left(\sum_{k=1}^m P_k (R_k - \bar{R}_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

onde:

- $\bar{R}_i$ retorno esperado para cada produto i considerando os cenários k ;
- P_k probabilidade de ocorrer o cenário k ;
- R_k taxa de retorno fixado por V_j para cada produto em cada cenário k ;
- σ_i desvio-padrão do produto i ;
- i índice de cada produto ofertado no leilão;
- k índice do cenário que compõe o jogo estratégico;
- m número total de cenários k .

O vendedor V_j também pode fixar um limite máximo do total de sua energia para ser ofertada em cada produto. Este valor serve para V_j diversificar seu portfólio de lances. A Tabela 4 apresenta os valores do retorno, desvio-padrão, calculados através das equações 2 e 3 utilizando os dados da Tabela 3, e do limite máximo a ser aplicado em cada produto em porcentagem definido por V_j .

Tabela 4. Retorno, desvio-padrão e limite máximo aplicado por produto.

	Produtos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{R}_i$	6,60%	8,70%	10,00%	12,50%	13,20%	15,00%	14,40%	15,30%	16,40%	13,70%	15,10%	16,10%
σ_i	1,74%	3,03%	13,46%	8,26%	8,72%	10,00%	9,46%	10,08%	10,90%	9,00%	9,91%	10,87%
Lm_i	30,00%	30,00%	30,00%	10,00%	10,00%	10,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

Com os dados do retorno esperado e do desvio-padrão de cada produto em relação à média é possível construir a matriz covariância entre os produtos. Esta matriz caracteriza não apenas a variação dos preços de um produto individual, mas como cada produto tende a se movimentar com a variação dos outros produtos. A equação 4 calcula a covariância entre dois produtos, por exemplo i e j , e a Tabela 5 apresenta os resultados utilizando os dados anteriores.

$$\sigma_{i,j} = \sum_{k=1}^3 P_k (R_i - \bar{R}_i)(R_j - \bar{R}_j) \quad (4)$$

Tabela 5. Matriz covariância.

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}
σ_1	0,0003	0,0005	0,0006	-0,0012	-0,0013	-0,0014	-0,0014	-0,0015	-0,0015	-0,0014	-0,0015	-0,0015
σ_2	0,0005	0,0009	0,0011	-0,0022	-0,0023	-0,0026	-0,0026	-0,0027	-0,0028	-0,0024	-0,0027	-0,0027
σ_3	0,0006	0,0011	0,0012	-0,0026	-0,0027	-0,003	-0,003	-0,0032	-0,0033	-0,0029	-0,0032	-0,0032
σ_4	-0,0012	-0,0022	-0,0026	0,0068	0,0072	0,0083	0,0078	0,0083	0,009	0,0074	0,0082	0,0089
σ_5	-0,0013	-0,0023	-0,0027	0,0072	0,0076	0,0087	0,0082	0,0088	0,0095	0,0078	0,0086	0,0094
σ_6	-0,0014	-0,0026	-0,003	0,0083	0,0087	0,01	0,0094	0,0101	0,0109	0,009	0,0099	0,0109
σ_7	-0,0014	-0,0026	-0,003	0,0078	0,0082	0,0094	0,0089	0,0095	0,0103	0,0085	0,0094	0,0101
σ_8	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0083	0,0088	0,0101	0,0095	0,0102	0,011	0,0091	0,01	0,0109
σ_9	-0,0015	-0,0028	-0,0033	0,009	0,0095	0,0109	0,0103	0,011	0,0119	0,0098	0,0108	0,0118
σ_{10}	-0,0014	-0,0024	-0,0029	0,0074	0,0078	0,009	0,0085	0,0091	0,0098	0,0081	0,0089	0,0097
σ_{11}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0082	0,0086	0,0099	0,0094	0,01	0,0108	0,0089	0,0098	0,0106
σ_{12}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0089	0,0094	0,0109	0,0101	0,0109	0,0118	0,0097	0,0106	0,0118

Para completar os dados de entrada do modelo V_j precisa determinar a taxa de retorno desejada para o leilão. Para este estudo de caso V_j fixou esta taxa em $\bar{R} = 11\%$. Então, com estes dados é possível fazer a otimização. O resultado do modelo após a otimização encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6. Alocação ótima dos lances de V_j .

	Produtos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W_i	7,87%	30,0%	30,0%	0,00%	0,00%	2,23%	5,00%	5,00%	5,00%	4,90%	5,00%	5,00%

A função objetivo do modelo retornou um valor de $\sigma_p = 1,71\%$ de risco para esta distribuição de lances no leilão dado uma taxa de retorno fixado pelo vendedor em $\bar{R} = 11\%$.

6. Considerações finais

Os leilões de contratos bilaterais são responsáveis por um grande percentual do total de contratos negociados no mercado de energia elétrica brasileiro. Isto se deve ao fato de as empresas geradoras estatais serem obrigadas a vender no mínimo 50% do total de sua energia através de leilões e da obrigatoriedade das concessionárias de distribuição de ter 95% do total de sua demanda prevista amarrados a contratos bilaterais.

Este trabalho teve em foco o leilão de venda organizado pelo MAE que ocorre uma vez por ano, cuja energia elétrica leiloadada é referente à liberação de 25% do total de energia dos contratos iniciais formatados antes da introdução do mercado concorrencial.

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para um agente vendedor fixar lances no leilão de venda utilizando a base conceitual da teoria dos jogos e portfólio. O resultado do modelo mostra que é possível obter um risco mínimo no leilão, dado um retorno fixado pelo vendedor, através de uma alocação ótima de lances nos produtos ofertados.

A formulação do modelo foi desenvolvida utilizando técnicas de otimização com a aplicação de programação não-linear quadrática. O uso desta técnica promove um modelo mais flexível já que ele possui facilidades em inserir e retirar restrições. Também foram utilizados cenários, onde o vendedor atribui probabilidades de ocorrência em cada um. Para testar o modelo foi realizado um estudo de caso utilizando um agente vendedor fictício.

7. Referências

- Elton, E. J. e M. J. Gruber (1981). *Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*. John Wiley and Sons.
- Ferrero, R. W., S. M. Shahidehpour, e V. C. Ramesh (1997). Transaction analysis in deregulated power systems using game theory. *IEEE Transactions on Power Systems* 12 (3), 1340–1347.
- Fudenberg, D.; J. Tirole (1998). *Game Theory*. MIT Press.
- Heap, S. P. H. e Y. Varoufakis (1995). *Game Theory: A Critical Introduction*. Routledge.
- Klemperer, P. (2000). *Why Every Economist Should Learn some Auction Theory*. Oxford University.
- Luenberger, D. G. (1984). *Linear and Nonlinear Programming* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- MAE (2002). Edital de leilão no 001/2002: Compra e venda de energia elétrica das concessionárias de serviços públicos: CGTEE, Chesf, Eletronorte e Furnas e outros geradores.

Moitre, D. (2002). Nash equilibria in competitive electric energy markets. *Electric Power Systems Research* 60, 153–160.

Neto, A. A. (2001). *Mercado Financeiro* (4th ed.). Editora Atlas.

Osborne, M. J. e A. Rubinstein (1994). *A Course in Game Theory*. MIT Press.

Song, H., C.-C. Liu, e J. Lawarrée (2002). Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market. *IEEE Transactions On Power Systems* 17 (1), 73–79.

Wolfstetter, E. (1999). *Topics in Microeconomics. Industrial Organization, Auctions, and Incentives*. Cambridge University Press.

Lista de Figuras:

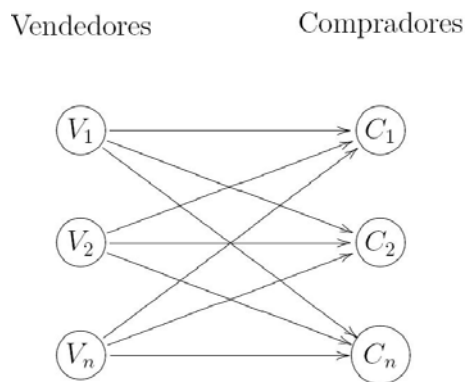


Figura 1. Leilão duplo com participantes identificados.

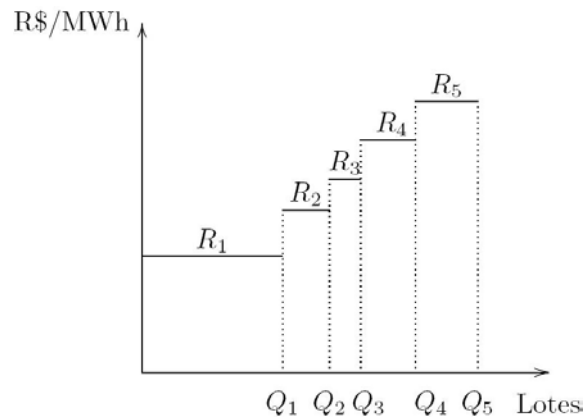


Figura 2. Curva de oferta para um produto.

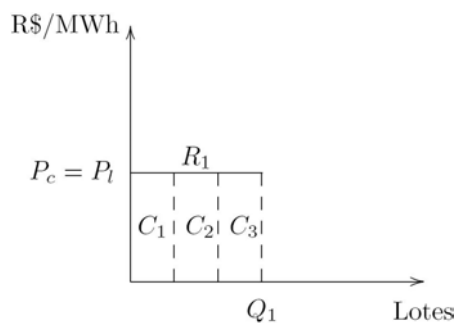


Figura 3. Início do leilão.

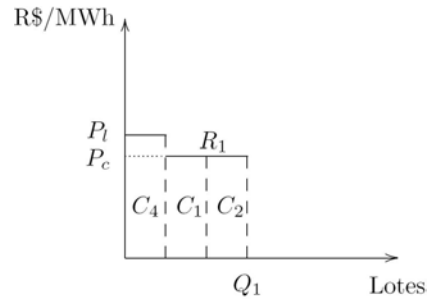


Figura 4. Novo valor de P_l .

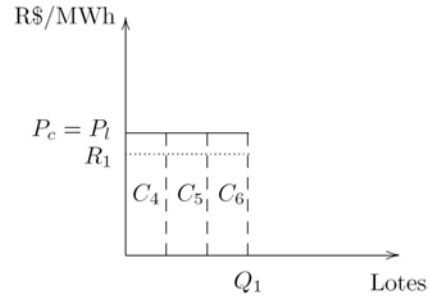


Figura 5. Valor de $P_l = P_c$.

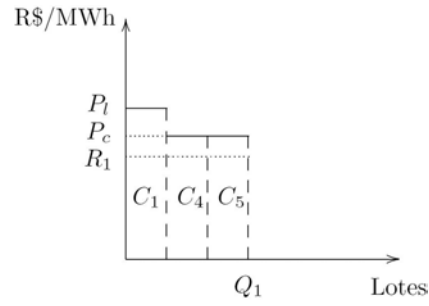


Figura 6. Novo valor de P_l .

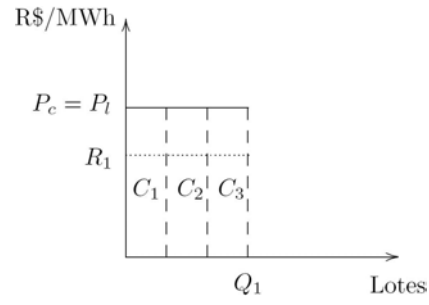


Figura 7. Novo valor de $P_l = P_c$.

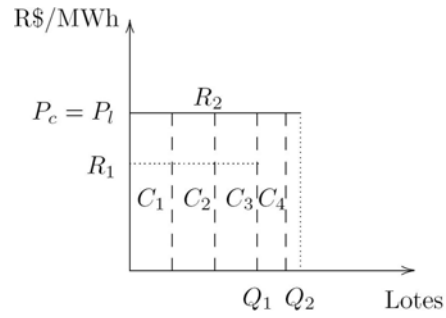


Figura 8. $P_l = P_c = R_2$.

Breve currículo:

Fernando C. Munhoz nasceu em Araçatuba, Brasil em 1978. Sendo graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), atualmente, está matriculado no curso de Mestrado na Área Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos da UNICAMP. Sua área de interesse é voltada para mercado de energia elétrica, leilões e otimização de sistemas energéticos.

Tiago B. Correia nasceu em Maputo, Moçambique em 1978. Sendo graduado em Economia no Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), atualmente, está matriculado no curso de Mestrado na Área Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos da UNICAMP. Sua área de interesse é voltada para comercialização de energia elétrica e regulação de mercados.

Paulo B. Correia nasceu em Belo Jardim, Brasil em 1954. Sendo graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Pernambuco – UFPE, recebeu o título de Mestre em 1984 e o título de doutor em 1989, ambos em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Sua área de interesse inclui sistemas de otimização e mercado de eletricidade.