

# Definição de Estratégias de Lances de Concessionárias de Distribuição em Leilões de Energia Elétrica do Tipo *Loose Pool* Baseadas em Teoria de Jogos

Vinícius Blaya Alvarenga, Guilherme Guimarães Lage

**Resumo**—Dada a desregulamentação do Setor Elétrico Brasileiro e a definição do Novo Modelo do Setor Elétrico do Brasil em 2004, empresas de geração e comercialização e concessionárias de distribuição se tornaram capazes de dar lances de venda e compra em leilões de energia elétrica autorizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) a fim de estimular a competitividade entre as empresas de cada atividade. Dessa forma, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo definir estratégias de lances de compra de energia elétrica por uma concessionária de distribuição utilizando Teoria de Jogos, com a finalidade de se evitar sua exposição aos preços de liquidação das diferenças (geralmente elevados) na contabilização pelo Operador Independente do Mercado (OIM). Para isso, implementou-se um modelo para simular a alocação de geração e cargas realizado pelo OIM para um sistema-teste de 6 barras considerando-se restrições de balanço de potência ativa nas barras do sistema e limites mínimos e máximos de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão. Como resultado direto da metodologia proposta, é possível definir as melhores estratégias de lances de compra de energia em um leilão em função do número de concorrentes e do número de lances a serem considerados.

**Index Terms**—estratégias de lances, leilões de energia elétrica, mercados de energia elétrica, teoria de jogos.

## I. INTRODUÇÃO

ATÉ meados da década de 1990, o setor elétrico de diversos países no mundo e os respectivos mercados de energia elétrica eram considerados monopólios naturais verticalmente integrados, onde uma única empresa poderia gerar, transmitir e distribuir energia elétrica para um grupo de consumidores cativos, não havendo qualquer tipo incentivo à eficiência operacional e à competição entre os agentes participantes desse mercado. Devido à falta de investimentos em infraestrutura e de competitividade no setor, diversas crises energéticas foram deflagradas nesse período, como na Califórnia, em 2001, e no Brasil, também em 2001 [1].

Em função dessas limitações inerentes aos modelos de mercados baseados em monopólios naturais, os setores elétricos de diversos países passaram por uma profunda reestruturação institucional e regulamentar a partir da década de 1990 marcada pela mudança do modelo de monopólio verticalmente integrado para um modelo de competição desverticalizada

com o intuito de fomentar investimentos em infraestrutura em cada tipo de atividade (geração, transmissão e distribuição) e promover competitividade entre os agentes participantes (geradores, comercializadores, exportadores e importadores) - os segmentos de transmissão e distribuição, considerados monopólios naturais, foram mantidos sob regulação dos Estados. No entanto, as concessionárias de distribuição devem contratar antecipadamente por meio de leilões de energia elétrica toda a demanda dos seus grupos de consumidores cativos. Qualquer diferença entre a demanda contratada e a demanda efetivamente consumida é precificada de acordo com os preços de liquidação das diferenças (geralmente elevados) na contabilização pelo Operador Independente do Mercado (OIM), referenciados na literatura correlata como problemas de compensação de mercado.

Assim, com a Definição do Novo Modelo do Setor Elétrico do Brasil em 2004, o mercado de energia elétrica brasileiro começou a ser operado com base no modelo híbrido (combinação dos modelos *pool* e bilateral). No modelo *pool*, todas as transações devem ser realizadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), isto é, o OIM, considerando o balanço de potência ativa nas barras do sistema, os limites mínimos e máximos de fluxo de potência nas linhas de transmissão e os limites de oferta e demanda de energia definidos pelos agentes de geração, comercialização e distribuição. O modelo *pool* é formulado matematicamente por um mecanismo de leilão, cujo principal objetivo é maximizar a função bem-estar social, ou seja, maximizar a diferença entre os as quantidades de compra e venda de energia, sendo classificado em duas categorias: *tight pool* e *loose pool*. Já no modelo bilateral, contratos de compra e venda são firmados diretamente entre os agentes de geração e comercialização e a concessionária de distribuição ou consumidor livre e registrados na CCEE, e o Operador Nacional do Sistema (ONS), isto é, o Operador Independente do Sistema (OIS), é responsável por apenas verificar se os contratos firmados podem ser realizados sem sobrecarregar as linhas de transmissão ou extrapolar os limites técnicos-operacionais do sistema.

No *tight pool*, os geradores fornecem seus dados técnicos referentes às curvas de custos ao OIS e este realiza o despacho ativo visando o menor custo e/ou maior confiabilidade do sistema segundo as políticas energéticas em vigor. Já no *loose pool*, os agentes geradores, comercializadores e distribuidores submetem lances de venda e compra ao OIM, o qual irá reali-

zar a alocação de geração e cargas a fim de atender a demanda ao menor preço marginal local possível [2]. Sendo assim, para participantes do *loose pool*, é de suma importância definir estratégias de lances, pois caso um gerador ou comercializador ofereça energia a um preço demasiadamente elevado, ele corre o risco de ter o seu lance recusado e não ser despachado, e caso um distribuidor demande energia a um preço muito abaixo de seus concorrentes, ele corre o risco de não ter a sua demanda alocada e ser obrigado a comprar energia no mercado de curto prazo, sujeito a preços mais elevados em leilões com menor horizonte de planejamento, ou mesmo ao preço de liquidação das diferenças (preço *spot*) na compensação.

Nesse contexto, a Teoria de Jogos pode ser empregada, simulando cenários do mercado de energia e auxiliando na tomada de decisão dos agentes participantes. Historicamente, o estudo da Teoria de Jogos se deu formalmente em 1912 pelo trabalho de Ernst Zermelo, onde demonstrou que, em um jogo de xadrez, sempre haveria uma estratégia vencedora para um dos jogadores, independente das ações tomadas pelo adversário e da atual posição das peças no tabuleiro [3]. A partir disso, estudos e teoremas foram surgindo sobre o tema, como o Teorema Minimax de John Von Neumann em 1928, com grande aplicabilidade em inúmeras áreas do conhecimento, como economia, biologia e engenharia. A Teoria de Jogos, por definição, pode ser compreendida como uma simulação de jogadas feitas pelos participantes, que interagem entre si em um jogo, de modo que ao se avaliar o resultado obtido, cada participante deverá escolher a estratégia a qual mais se aproxima de seus interesses.

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é definir estratégias de lances para concessionárias de distribuição no modelo *loose pool* por meio da Teoria de Jogos, considerando um sistema-teste de 6 barras.

Este trabalho de conclusão de curso está organizado da seguinte forma. Na Seção II é apresentada a modelagem do leilão de energia elétrica para o modelo de mercado do tipo *loose pool*. Na Seção III é apresentada a metodologia para a definição de estratégias de lances para concessionárias de distribuição no modelo *loose pool* por meio da Teoria de Jogos. Os resultados numéricos obtidos são apresentados na Seção IV. Na Seção V são apresentadas as principais conclusões deste trabalho de conclusão de curso.

## II. FORMULAÇÃO DO LEILÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O MODELO LOOSE POOL

Como mencionado anteriormente, a formulação matemática no mercado *pool* é dada por um modelo de leilão, onde os agentes participantes submetem ofertas de venda e compra ao OIM, e este aloca a geração e as cargas visando maximizar o bem-estar social, considerando-se as restrições de balanço de potência ativa nas barras e os limites do fluxo de potência nas linhas de transmissão do sistema.

A função bem-estar social [4] pode ser entendida como a função capaz de encontrar o preço de equilíbrio entre o valor mais alto que um gerador está disposto a vender sua energia e o valor mais baixo que um distribuidor está disposto a pagar pela energia demandada. Sendo assim, tal função é capaz

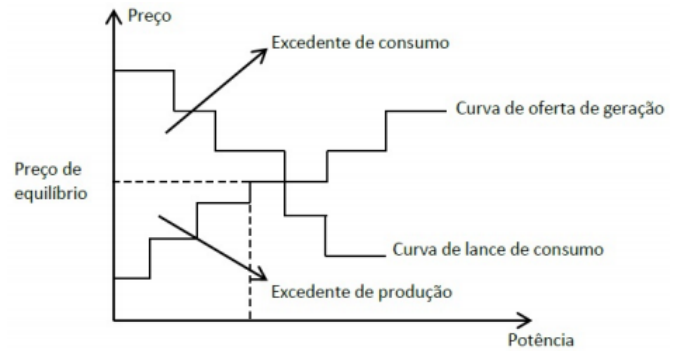


Figura 1. Representação gráfica do bem-estar social [4].

de estimular a competitividade do mercado, pois incentiva geradores e distribuidores a ofertarem sua produção e demanda próximo ao preço de equilíbrio (preço local marginal). A Figura 1 exemplifica o conceito base da função bem-estar social.

Neste trabalho de conclusão de curso, o modelo do leilão de energia elétrica utilizado para o modelo de mercado *loose pool* consiste em maximizar a função bem-estar social, sujeito às restrições de balanço de potência ativa linearizada nas barras, os limites mínimos e máximos dos blocos de energia ofertados pelo geradores e demandados pelas concessionárias de distribuição e os limites mínimos e máximos de fluxos de potência nas linhas de transmissão. Desconsideram-se neste modelo as perdas ativas nas linhas de transmissão, as restrições de balanço de potência reativa nas barras, os limites mínimos e máximos de geração de potência reativa nas barras de geração e as magnitudes das tensões nodais devido a aplicação do modelo linearizado para horizontes de planejamento de médio e longo prazos [5].

$$\max \quad \pi_D^T P_D - \pi_S^T P_S \quad (1a)$$

$$\text{s. a:} \quad P = B\theta \quad (1b)$$

$$P_{D_{min}} \leq P_D \leq P_{D_{max}} \quad (1c)$$

$$P_{S_{min}} \leq P_S \leq P_{S_{max}} \quad (1d)$$

$$P_{ij_{min}} \leq P_{ij}(\theta_{ij}) \leq P_{ij_{max}} \quad (1e)$$

onde:

- $\pi_D$  é o vetor dos lances do preço de compra de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição;
- $P_D$  é o vetor do bloco de energia demandada pelas concessionárias de distribuição;
- $\pi_S$  é o vetor dos lances do preço de venda de energia elétrica pelos geradores e comercializadores;
- $P_S$  é o vetor do bloco de energia ofertada pelos geradores e comercializadores;
- $P$  é o vetor das injeções líquidas de potência ativa em cada barra, onde  $P = (P_G + P_S) - (P_C + P_D)$ ,  $P_G$  é o vetor das gerações previamente alocadas e  $P_C$  é o vetor das cargas previamente alocadas;
- $B$  é matriz de susceptâncias nodal do sistema;
- $\theta$  é vetor dos ângulos de fase das tensões nodais;

- $P_{D_{min}}$  e  $P_{D_{max}}$  são os vetores de limites mínimos e máximos dos blocos de energia demandada pela concessionárias de distribuição;
- $P_{S_{min}}$  e  $P_{S_{max}}$  são os vetores de limites mínimos e máximos dos blocos de energia ofertada pelos geradores e comercializadores;
- $P_{ij}(\theta_{ij})$  é a função vetorial dos fluxos de potência ativa nos ramos do sistema;
- $P_{ij_{min}}$  e  $P_{ij_{max}}$  são os vetores de limites mínimos e máximos dos fluxos de potência ativa nos ramos do sistema.

No modelo (1),  $P_D$  e  $P_S$  são as variáveis de controle que serão otimizadas;  $\theta$  são as variáveis dependentes determinadas em função do valor ótimo das variáveis de controle; e  $\pi_D$ ,  $\pi_S$ ,  $P_G$ ,  $P_C$ ,  $B$ ,  $P_{D_{min}}$ ,  $P_{D_{max}}$ ,  $P_{S_{min}}$ ,  $P_{S_{max}}$ ,  $P_{S_{min}}$  e  $P_{S_{max}}$  são parâmetros (dados) do problema.

### III. TEORIA DE JOGOS

Na Teoria de Jogos, um jogo pode conter diversas classificações como: cooperativo ou não cooperativo, estático ou dinâmico, com informação perfeita ou imperfeita, e de soma zero ou soma diferente de zero. Porém para aplicações em mercados de energia elétrica, os jogos são não cooperativos, onde jogadores atuam de maneira competitiva e de forma isolada; estáticos, onde a decisão é tomada uma única vez pelo jogador; e de soma diferente de zero, onde o lucro de um jogador não representa o prejuízo de seus adversários [6].

É sabido que cada concessionária de distribuição deverá adotar uma estratégia capaz de maximizar seu resultado, ou seja, obter a maior quantidade de energia ao melhor preço marginal local após o cálculo do alocação de geração e cargas pelo OIM, pois assim não precisará comprar sua demanda remanescente no mercado de curto prazo, sujeito a preços mais elevados em leilões com menor horizonte de planejamento, ou mesmo ao preço de liquidação das diferenças (preço *spot*) na compensação.

Para a simulação dos jogos envolvendo mercados de energia, será utilizada a metodologia apresentada em [7], porém com as devidas adaptações para aplicação neste trabalho de conclusão de curso. Entre as características de mercado a serem simulados, sabe-se que:

- os agentes distribuidores (ADs) são independentes e agem de maneira competitiva entre si;
- os lances de demanda dos ADs são compostos pelos limites inferiores e superiores dos blocos de energia demandada e pelo preço de compra de energia elétrica;
- o OIM é responsável pela alocação de geração e cargas e divulgação do resultado do leilão após a resolução do modelo em (1).

#### A. Formação do Conjunto de Estratégias

Para um sistema-teste de 6 barras, cada AD deverá submeter ao OIM um lance de compra contendo quantidade de energia demandada ( $P_D$ ) e preço por unidade ( $\pi_D$ ):

$$\text{Lance: } (P_D, \pi_D)$$

sendo que a demanda e o preço são relacionados a características particulares de cada AD, como curva de custos e estratégias de mercado.

Para formação do conjunto de estratégias  $S_{AD}$ , define-se um vetor de 5 posições de maneira que cada posição representa uma estratégia de lance adotado por AD, como segue:

$$S_{AD} = \{S^1, S^2, S^3, S^4, S^5\} \\ = \{(P_D^1; \pi_D^1), (P_D^2; \pi_D^2), (P_D^3; \pi_D^3), (P_D^4; \pi_D^4), (P_D^5; \pi_D^5)\} \quad (2)$$

#### B. Modelagem dos concorrentes

Com o intuito de validar suas estratégias, o AD irá “criar” agentes virtuais AV, responsáveis por simular o comportamento de seus concorrentes.

#### C. Determinação da melhor estratégia

Após criação dos agentes virtuais  $AV_1$  e  $AV_2$ , o AD irá simular jogos estratégicos com seus concorrentes, e agrupará os resultados em uma matriz de *payoff*, a qual representa a porcentagem de sucesso obtido pelo AD para cada estratégia simulada.

A matriz de *payoff* é organizada de modo que as estratégias do AD são apresentadas nas colunas e as estratégias de  $AV_1$  e  $AV_2$  são apresentadas nas linhas da matriz. O sucesso de AD para cada jogada é dado pela razão entre a quantidade de energia obtida após a alocação de geração e cargas pelo OIM e a quantidade de energia ofertada, representado por  $T_{AD}$  e anexada a cada célula da matriz de *payoff*.

$$T_{AD} = \frac{\text{potência alocada [p.u.]}}{\text{potência demandada [p.u.]}} 100 [\%] \quad (3)$$

A solução do jogo é encontrada pelo critério de MaxMin, definido como o maior resultado entre os menores obtidos em uma matriz de *payoff*, indicando qual estratégia de AD trará maior energia alocada entre seus lances estratégicos e de seus concorrentes. Para isso, seleciona-se o menor valor de cada coluna, formando o vetor de resultados mínimos esperados ( $r_{AD}$ ), e escolhe-se o maior valor entre as posições existentes. O valor encontrado será o Valor MaxMin ( $v_{AD}$ ). Em seguida, determina-se o número de elementos de  $r_{AD}$  equivalentes ao Valor MaxMin, sendo representado por  $nv_{AD}$ . Para encontrar a probabilidade associada a cada elemento do vetor de resultados mínimos, cria-se o vetor de distribuição de probabilidades ( $\omega_{AD}$ ), onde todos os valores de  $r_{AD}$  menores que  $v_{AD}$  serão preenchidos com zero e os valores iguais a  $v_{AD}$  serão preenchidos com  $1/nv_{AD}$ , indicando a probabilidade de se obter o melhor resultado para cada estratégia.

#### D. Aplicação da melhor estratégia

Em seguida, AD deverá escolher o maior valor entre os componentes do vetor  $\omega_{AD}$ , pois esse irá apontar qual estratégia trará ao AD a maior probabilidade de se obter o melhor resultado. Caso uma mesma probabilidade seja associada a diversas estratégias, o AD deve escolher a que o traz maior vantagem econômica, nesse caso, a de menor custo.

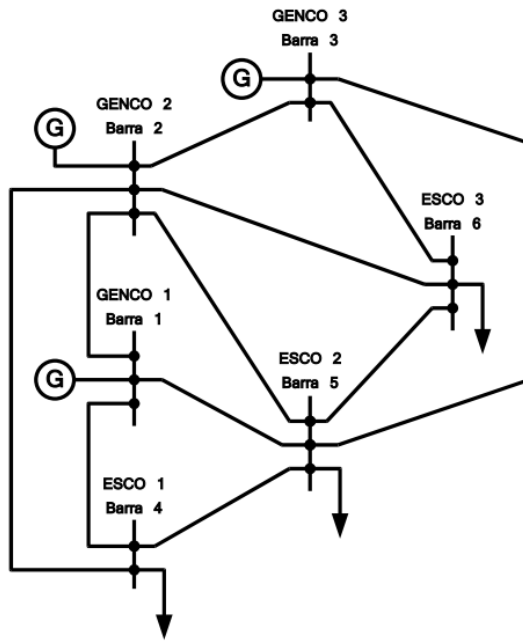


Figura 2. Agentes Participantes do Mercado de Energia Elétrica.

E. Análise dos resultados

Após o AD definir sua melhor estratégia, o mecanismo de leilão em (1) será simulado para definir a alocação de geração e cargas ao menor preço marginal local e retornar a quantidade de energia obtida pelo AD no processo. Fica a critério do AD reavaliar seus resultados após a definição do preço marginal local pelo mecanismo de leilão.

IV. RESULTADOS

Com o intuito de apresentar a definição de uma estratégia de lance de uma concessionária de distribuição para um leilão de energia elétrica do tipo *loose pool*, considera-se o seguinte sistema de 6 barras da Figura 2, com três geradores (GENCOs) e três concessionárias de distribuição (ESCOs) de acordo com a Tabela I.

TABELA I  
PARTICIPANTES DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

Barra	Agente
1	GENCO1
2	GENCO2
3	GENCO3
4	ESCO1
5	ESCO2
6	ESCO3

As restrições de oferta dos agentes geradores e demanda dos agentes distribuidores são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3, e os limites de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão são apresentados na Tabela 4 [8]. Todas as grandezas dessas tabelas são dadas em por unidade (p.u.).

TABELA II  
LIMITES DA OFERTA

Agente Gerador	$P_{S_{min}}$ [p.u.]	$P_{S_{max}}$ [p.u.]
GENCO1	0,00	0,15
GENCO2	0,00	0,20
GENCO3	0,00	0,10

TABELA III  
LIMITES DA DEMANDA

Agente Distribuidor	$P_{D_{min}}$ [p.u.]	$P_{D_{max}}$ [p.u.]
ESCO1	0,00	0,25
ESCO2	0,00	0,10
ESCO3	0,00	0,20

TABELA IV  
RESTRITÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA NAS LINHAS

Linha [i-j]	$P_{ij_{min}}$ [p.u.]	$P_{ij_{max}}$ [p.u.]
1-2	-0,154	0,154
1-4	-0,501	0,501
1-5	-0,429	0,429
2-3	-0,216	0,216
2-4	-0,682	0,682
2-5	-0,336	0,336
2-6	-0,521	0,521
3-5	-0,261	0,261
3-6	-0,650	0,650
4-5	-0,098	0,098
5-6	-0,022	0,022

Para que a previsão de alocação de geração e cargas pelo OIM seja determinada, é necessário o emprego de um *solver* de problemas de otimização lineares, dado que tanto a função objetivo quanto as restrições são lineares, como apresentado no modelo (1). Sendo assim, por meio do software MS Excel, o modelo (1) foi resolvido pelo *solver* do método Simplex LP.

Definidos o modelo do leilão de energia elétrica e dados os parâmetros do sistema elétrico, inicia-se a modelagem das estratégias de lances por uma concessionária de distribuição por meio da Teoria de Jogos. Neste trabalho, considera-se ESCO2 como AD, enquanto os agentes virtuais  $AV_1$  e  $AV_2$  representarão ESCO1 e ESCO3, respectivamente.

Sendo assim, os conjuntos de estratégias  $S$  de AD e dos virtuais  $AV_1$  e  $AV_2$  consideram valores fixos de demanda (iguais a  $P_{D_{max}}$  da Tabela III), e variações de  $\pm 5\%$  e  $\pm 10\%$  sobre o valor base dos preços dos lances de compra do AD e dos agentes virtuais. Tais variações são consideradas para a geração de diferentes cenários e combinações de jogos, e possuem o objetivo de se mostrar a influência dos preços dos lances nos resultados obtidos pelo distribuidor. Sendo assim, os valores adotados são apresentados na Tabela V.

TABELA V  
VALOR DE PREÇOS-BASE PARA CADA AGENTE E SUAS VARIAÇÕES

Agente	Preço-Base [R\$/p.u.]	+10%	+5%	-5%	-10%
AD	13,50	14,85	14,18	12,83	12,15
AV <sub>1</sub>	15,00	16,50	15,75	14,25	13,50
AV <sub>2</sub>	12,50	13,75	13,13	11,88	11,25

Os conjuntos de estratégias são apresentados abaixo:

$$\begin{aligned} S_{AD} &= \{S_{AD}^1, S_{AD}^2, S_{AD}^3, S_{AD}^4, S_{AD}^5\} \\ &= \{(0, 10; 14, 85), (0, 10; 14, 18), (0, 10; 13, 50), \\ &\quad (0, 10; 12, 83), (0, 10; 12, 15)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{AV_1} &= \{S_{AV_1}^1, S_{AV_1}^2, S_{AV_1}^3, S_{AV_1}^4, S_{AV_1}^5\} \\ &= \{(0, 25; 16, 50), (0, 25; 15, 75), (0, 25; 15, 00), \\ &\quad (0, 25; 14, 25), (0, 25; 13, 50)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{AV_2} &= \{S_{AV_2}^1, S_{AV_2}^2, S_{AV_2}^3, S_{AV_2}^4, S_{AV_2}^5\} \\ &= \{(0, 20; 13, 75), (0, 20; 13, 13), (0, 20; 12, 50), \\ &\quad (0, 20; 11,88), (0, 20; 11,25)\} \end{aligned}$$

Os resultados obtidos nos jogos, utilizando-se dos conjuntos  $S_{AD}$ ,  $S_{AV_1}$  e  $S_{AV_2}$ , são apresentados na matriz de *payoff* da Tabela VI, a qual representa a taxa de sucesso  $T_{AD}$  que o AD obterá após a alocação de geração e cargas pelo OIM.

TABELA VI  
MATRIZ DE PAYOFF APÓS SIMULAÇÃO DOS JOGOS

	$S_{AD}^1$	$S_{AD}^2$	$S_{AD}^3$	$S_{AD}^4$	$S_{AD}^5$
$S_{AV_1, AV_2}^1$	72,71	72,71	72,71	72,71	0,00
$S_{AV_1, AV_2}^2$	72,71	72,71	72,71	72,71	0,00
$S_{AV_1, AV_2}^3$	98,93	72,71	72,71	72,71	0,00
$S_{AV_1, AV_2}^4$	98,93	98,93	98,93	72,71	72,71
$S_{AV_1, AV_2}^5$	98,93	98,93	98,93	98,93	98,93

Para a aplicação do critério MaxMin, seleciona-se o menor valor de cada coluna para obtenção do vetor de resultados mínimos esperados  $r_{AD}$ , representado por:

$$r_{AD} = [72, 71 \quad 72, 71 \quad 72, 71 \quad 72, 71 \quad 0, 00] \quad (4)$$

Em seguida seleciona-se o maior valor encontrado entre as posições do vetor  $r_{AD}$ ; o valor MaxMin  $v_{AD}$  é dado por:

$$v_{AD} = 72, 71 \quad (5)$$

O vetor de distribuição de probabilidades  $\omega_{AD}$  é obtido comparando-se os valores do vetor de resultados mínimos esperados ( $r_{AD}$ ) com o valor MaxMin ( $v_{AD}$ ), onde, caso um valor de  $r_{AD}$  seja igual a  $v_{AD}$ , o vetor  $\omega_{AD}$  é preenchido com  $1/nv_{AD}$  naquela posição, caso contrário, é zero. Como o valor MaxMin  $v_{AD}$  se repete quatro vezes em ( $r_{AD}$ ),  $nv_{AD} = 4$ , e o vetor  $\omega_{AD}$  é dado por:

$$\omega_{AD} = [0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0] \quad (6)$$

Os valores de  $\omega_{AD}$  apontam que, caso escolha qualquer estratégia entre  $S_{AD}^1$  a  $S_{AD}^4$ , o AD terá 25% de chances de se obter o resultado esperado, que é o de alocar 72.71% da sua demanda. Do ponto de vista econômico,  $S_{AD}^4$  torna-se a melhor estratégia para o AD, pois aloca sua demanda a R\$ 12,83/p.u. com 72.71% de chances de sucesso, sendo mais vantajoso que a estratégia  $S_{AD}^1$ , cujo preço de lance é de R\$ 14,85/p.u.

É importante ressaltar que nem sempre a Teoria de Jogos irá encontrar a estratégia de menor custo, mas sim a estratégia que irá trazer os melhores resultados. Por exemplo, a estratégia  $S_{AD}^5$  é precificada a R\$ 12,15/p.u., custando menos que a estratégia vencedora  $S_{AD}^4$ . No entanto, seu sucesso no leilão dependeria exclusivamente dos lances ofertados por seus adversários, o que lhe poderia trazer 98.93% de demanda alocada, como também a possibilidade de não alocar demanda alguma. Além disso, o lance ofertado pela estratégia  $S_{AD}^5$  está abaixo do custo marginal ofertado na barra onde AD se encontra, de modo que lances abaixo desse custo são recusados em um leilão de energia.

Com o intuito de mensurar o quão próximo o preço da estratégia vencedora  $S_{AD}^4$  se aproximou do preço local marginal, apresenta-se a Tabela VIII para cada combinação de AV<sub>1</sub> e AV<sub>2</sub>, bem como seu percentual de asserto. Isso é relevante, pois o agente deverá honrar com o lance ofertado e quanto mais próximo o lance do agente for do preço local marginal, maior será seu custo evitado. O modelo desenvolvido foi capaz de definir uma estratégia cujo asserto mínimo é de 90% e máximo de 98%.

TABELA VII  
PREÇOS MARGINAIS LOCAIS PARA O AD EM FUNÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DO AV<sub>1</sub> E AV<sub>2</sub> CONCORRENTES

	Preço Marginal Local [R\$/p.u.]	Preço em $S_{AD}^4$ [R\$/p.u.]	Asserto [%]
$S_{AV_1, AV_2}^1$	12,62	12,83	98
$S_{AV_1, AV_2}^2$	12,39	12,83	96
$S_{AV_1, AV_2}^3$	12,17	12,83	95
$S_{AV_1, AV_2}^4$	11,94	12,83	93
$S_{AV_1, AV_2}^5$	11,68	12,83	90

Com a intenção de avaliar a influência das restrições de fluxo de potência ativa nas linhas do sistema, simulou-se uma nova estratégia ( $S^6$ ) em que todos os agentes fizeram um lance de compra ao mesmo preço, conforme a Tabela VIII. Assim, é de se esperar que o OIM não priorize a alocação de energia com base nos lances do leilão, e sim com base

na disponibilidade de se alocar no sistema as demandas das concessionárias de distribuição.

TABELA VIII  
LANCES DE DEMANDA COM PREÇOS IGUAIS

Estratégia	Valor Base [R\$]	Demanda [p.u.]
$S_{AD}^6$	12,83	0,10
$S_{AV_1}^6$	12,83	0,25
$S_{AV_2}^6$	12,83	0,20

Com o resultado dessa simulação, apresenta-se a Tabela IX, onde é possível observar que  $AV_2$  foi capaz de alocar toda sua demanda, enquanto AD e  $AV_1$  alocaram parcialmente suas demandas. Essa justificativa se dá pelo fato de AD e  $AV_1$  estarem localizados nas barras 5 e 4, respectivamente, onde os limites máximos de fluxo de potência ativa foram atingidos nos ramos 2-5 e 2-4. Além disso, como o preço ofertado por  $AV_2$  foi maior que o preço marginal local, este agente teve prioridade de alocação da sua demanda em relação aos seus concorrentes, cujos lances foram equivalentes aos respectivos preços marginais locais.

TABELA IX  
RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA  $S_6$

Estratégia	Lance de Demanda [p.u.]	Demanda Alocada [p.u.]
$S_{AD}^6$	0,10	0,07
$S_{AV_1}^6$	0,25	0,14
$S_{AV_2}^6$	0,20	0,20

## V. CONCLUSÕES

Mediante ao modelo desenvolvido, cujo principal objetivo era de ajudar concessionárias de distribuição a ofertarem lances de compra de energia elétrica em leilões de energia do tipo *loose pool* e evitar que os agentes fossem expostos aos preços do mercado de curto prazo (*spot*), foi possível encontrar uma estratégia vencedora por meio da Teoria de Jogos utilizando-se baixo poder computacional.

Como resultado, a estratégia vencedora  $S_{AD}^4$  foi capaz de suprir aproximadamente 73% da demanda de ESCO2, demonstrando que o objetivo do trabalho foi cumprido já que a maior parte da demanda alocada foi suprida e que o

restante poderá ser alocado em leilões futuros ou no mercado de curto prazo (*spot*), e com desvio máximo de 10% em relação ao preço marginal local, responsável por estimular a competitividade entre os agentes participantes.

Por fim, uma possível análise para trabalhos futuros seria o de utilizar os valores divulgados em leilões de energia elétrica ocorridos no passado e aplicá-los no modelo desenvolvido. Assim, seria possível verificar a robustez e proximidade com a realidade que o modelo traz.

## REFERÊNCIAS

- [1] Elbia Vinhaes, 2003. "Estrutura de Governança e Comportamento Estratégico em Sistemas Elétricos Reestruturados: uma Abordagem Institucional do Poder de Mercado na Indústria de Energia Elétrica Brasileira," Anais do XXXI Encontro Nacional de Economia [Proceedings of the 31st Brazilian Economics Meeting], ANPEC - Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia [Brazilian Association of Graduate Programs in Economics]. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/anp/en2003/d09.html>.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nota Técnica N86/2014-SEM/ANEEL. Brasília: Aneel, 2014. 17p. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/NT\\_86\\_2014\\_Metodologia\\_Limites\\_PLD.pdf](https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT_86_2014_Metodologia_Limites_PLD.pdf). Acesso em: 04 jun. 2020.
- [3] SARTINI, Alexandre; GARBUGIO, Gilmar; BORTOLOSSI, Humberto José. Uma Introdução a Teoria dos Jogos. Bahia: Sbm, 2004. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~rvicente/IntroTeoriaDosJogos.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2021.
- [4] CONEJO, Francisco D. Galiana And Antonio J.. Economics of Electricity Generation: market-clearing procedures: single-period auction. In: CONEJO, Antonio J.; CANIZARES, Claudio; GOMEZ-EXPOSITO, Antonio. Electric Energy Systems: analysis and operation. Analysis and Operation. New York: Crc Press, 2009. p. 165-210.
- [5] MONTICELLI, Alcir José. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1983
- [6] COSTA FILHO, Nilson Sá. Uma análise comparativa da aplicação da teoria de jogos aos vários tipos de leilões em mercados elétricos. 2017. 90 f. Tese (Doutorado)-Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luis/MA, 2017. Disponível em: <https://tede.ufma.br/jspui/bitstream/tede/1241/2/Nilson%20Sa.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2020.
- [7] NEPOMUCENO, L. SILVA, Paulo Sérgio da; Simulação de Mercados de Energia Utilizando Teoria de Jogos e Agentes Inteligentes. Descrição do Modelo. In: SBAI 2007 - VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007, Florianópolis. Anais do SBAI 2007 - VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007.
- [8] F. Milano, C. A. Cañizares, and M. Invernizzi, "Multi-objective optimization for pricing system security in electricity markets," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 2, pp. 596 – 604, May 2003.
- [9] OLIVEIRA, Alberto Quialheiro de. Modelo de Leilão Multiperíodo para Sistemas Hidrotérmicos em Mercados Pool de Energia do Dia Seguinte. 2016. 160 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/141893>. Acesso em: 08 jun. 2020.