

USO DA TEORIA DOS JOGOS COMO MÉTODO INOVADOR NO PROCESSO DECISÓRIO DE INVESTIMENTO DA ENERGIA SOLAR

Aldenis E. A. G. de França – aldenis.everton@gmail.com

Danielle C. D. Cunha – dani.case@hotmail.com

Lázara S. Castrillo – lazaracastrillo@hotmail.com

Monique S. de L. e S. Tomaz – monikii007@hotmail.com

Universidade de Pernambuco – UPE, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia
Rua Benfica, 455 – Madalena
50720-001 – Recife – PE

Resumo: *O presente artigo tem como objetivo apresentar o uso da teoria dos jogos como método inovador no processo decisório de investimento entre duas empresas de geração de energia solar no nordeste brasileiro. A metodologia utilizada para esta análise foi o método de Cournot para concluir se está prevalecendo no mercado a competição ou a cooperação entre os agentes envolvidos.*

Palavras-chave: *Competição. Energia solar. Investimento. Modelo de Cournot. Teoria dos Jogos.*

1 INTRODUÇÃO

A Teoria dos Jogos tem o objetivo de analisar situações nas quais os resultados das ações de indivíduos ou instituições dependem substancialmente das ações de outros indivíduos, ou seja, trata de situações onde nenhum personagem pode convenientemente tomar decisão sem levar em conta as possíveis decisões dos outros. (FIGUEIREDO, 1994).

Um jogo pode ser exposto matematicamente de diversas maneiras, isto é, de acordo com as propriedades dele que se deseja explorar. A forma mais detalhada de se apresentar um jogo é na forma extensiva a qual se refere à descrição concentrada no movimento sequencial do mesmo. Nessa forma, as decisões são tomadas uma após a outra. O conceito de estratégia tomado como a descrição completa de como uma pessoa que participa de um jogo pode agir sob quaisquer circunstâncias, ou um curso de ação qualquer de um agente em um jogo na forma extensiva, nos permite definir e expressar o jogo em uma forma mais simples e objetiva, e por isso de maior importância teórica, chamada forma normal ou forma estratégica. (FIGUEIREDO, 1994).

Há dois outros pontos que devem ser destacados durante uma modelagem na forma estratégica é o fato de que cada jogador pode ignorar a decisão do outro no momento em que toma a sua decisão e a não preocupação com o tempo após a tomada de decisão, ou seja, os jogadores só consideram as consequências imediatas durante a decisão. Esses dois aspectos caracterizam um jogo simultâneo.

A aplicação da Teoria dos Jogos no cenário elétrico nacional deve ser uma alternativa de tomadas de decisões. Durante a reestruturação do setor, que passou a ser descentralizado, promove-se uma competição entre geradoras e distribuidoras de energia. No modelo misto, o qual inclui empresas estatais e privadas, encontra-se em discussão a implantação dos lances de oferta e demanda para a determinação do preço spot, como já ocorre em diversos países.

Nesse contexto, as empresas constituem um novo ambiente, competindo pela quantidade de energia elétrica a ser disponibilizada no mercado e por preços, tanto através de contratos bilaterais e no mercado spot, como pelos novos empreendimentos. Essa competição não é simples, pois as ações de um agente de mercado dependem das ações dos outros agentes. O que se tem é um jogo de interesses cruzados, em que cada agente busca maximizar o benefício, o qual não diz respeito simplesmente à fatia de mercado, mas sim ao lucro das empresas. A Teoria dos Jogos encontra aplicação direta nesse conflito de interesses e pode ser utilizada sob dois diferentes pontos de vista em mercados de energia elétrica: o do agente e o do órgão regulador. O primeiro tem o objetivo de maximizar seu lucro e o segundo de assegurar o bom funcionamento do mercado.

As considerações apresentadas motivaram o objetivo deste artigo para a apresentação da análise do comportamento de dois agentes no mercado de energia elétrica solar no Nordeste do Brasil, utilizando a Teoria dos Jogos. Para isto, utilizou-se o Modelo de Cournot com duas empresas e busca-se concluir se está prevalecendo no mercado a competição ou a cooperação entre os agentes envolvidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uma breve história da teoria dos jogos

Em 1838, o matemático, filósofo e economista francês Antoine Augustin Cournot (1801-1877), publicou o modelo de Cournot, o qual consiste em uma análise de comportamento de duas empresas que decidiam simultaneamente que quantidade produzir, isto é, a introdução ao duopólio.

Em 1928, o matemático Jon von Neumann deu o primeiro passo demonstrando o teorema minimax. Neumann mostrou interesse em economia e, junto com o economista Oscar Morgenstern, publicou o clássico “*The Theory of Games and Economic Behavior*” em 1944 e, com isto, a Teoria dos Jogos invadiu a economia e a matemática aplicada.

Em 1950, o matemático John Forbes Nash Jr. publicou quatro artigos importantes para a Teoria dos Jogos não cooperativos e para a teoria de barganha. Em “*Equilibrium Points in n-Person Games*” e “*Non-cooperative Games*”, Nash provou a existência de um equilíbrio de estratégias mistas para jogos não cooperativos, denominado Equilíbrio de Nash, e sugeriu uma abordagem de estudos de jogos cooperativos, a partir de sua redução para forma não cooperativa.

2.2 O poder de mercado

O poder de mercado é a capacidade que um agente econômico tem em manter os seus preços acima do nível competitivo ou aprimorar a penetração de mercado, de forma a maximizar os seus lucros obtendo mais clientes ou clientes mais lucrativos.

O que pôde ser observado na Inglaterra, e em parte no Brasil, na criação do mercado de energia elétrica, foi a quebra do monopólio integrado vertical, criando um mercado horizontal

e reduzindo o poder de mercado (LANZOTTI, 2002). Mesmo assim, ainda permanece um grau de poder, que dependerá de como o mercado foi subdividido. As restrições de transmissão, por sua vez, tendem a dividir o mercado em submercados e podem conduzir a graus de concentração de poder de mercado elevados nestes submercados. Além disso, as empresas, em localizações estratégicas, podem congestionar os fluxos nestas interligações, a fim de criar a escassez nos submercados e subir preços.

2.3 A teoria dos jogos aplicada a modelos oligopolistas

A Teoria dos Jogos pode ser utilizada em duas perspectivas distintas em um mercado de energia elétrica. A primeira seria sob a ótica do órgão regulador, que através da aplicação de modelos de oligopólio ao respectivo mercado, poderia fiscalizar como seus agentes estão se comportando, se o predominate tem sido a cooperação ou a competição entre os agentes, pois isso influencia diretamente no preço do mercado.

A segunda perspectiva seria a visão de um determinado agente que tem como objetivo escolher uma estratégia, para que sua atuação no mercado maximize seu lucro. Para isso, esse agente utilizaria a Teoria dos Jogos como uma ferramenta para prever as estratégias de seus concorrentes, com base em informações que ele dispõe sobre o mercado e nas estratégias utilizadas pelos seus concorrentes no passado. Então, com o conjunto de expectativas para as estratégias de seus oponentes em mãos, esse agente resolveria um problema de otimização, potencializando o seu benefício.

Nesse contexto, o modelo mais útil para os reguladores de mercado seria o Modelo de Cournot, o qual está dentro do conceito de Equilíbrio de Nash. Neste caso, as variáveis estratégicas são as quantidades ofertadas, e os preços são estabelecidos de acordo com a quantidade total produzida no mercado, os quais são definidos com base na demanda agregada do setor. Esse modelo de jogo de um único estágio, não leva em conta ações repetidas. Através do Modelo de Cournot, o mercado define o preço e a quantidade de energia elétrica ofertada em contratos bilaterais.

2.4 O modelo de Cournot ou determinação simultânea de quantidades (com duas empresas)

O modelo de Cournot deriva seu nome do matemático, filósofo e economista francês Antoine Augustin Cournot (1801-1877), que publicou em 1838 uma análise de comportamento de duas empresas que decidiam simultaneamente que quantidade produzir (FIANI, 2015).

Este modelo representa a análise de mercados de poucas empresas, ou seja, oligopólios. Neste artigo será demonstrado o jogo com dois jogadores: Solar 1 e Solar 2. As duas empresas produzem energia solar para abastecer o mercado elétrico nacional. Energia elétrica é um produto homogêneo, isto é, os consumidores não irão perceber a diferença na qualidade do mesmo e, portanto, baseiam suas decisões sobre qual produto adquirir considerando apenas o preço, independente do gerador.

Como hipótese de comportamento, será admitido que cada empresa busca maximizar seu lucro. O lucro de uma empresa é a diferença entre sua receita e seus custos. É necessário definir a receita e o custo de cada empresa, de forma a construir uma função recompensa para cada uma delas.

A receita é o produto do preço de mercado pela quantidade vendida por cada empresa. Supondo que o preço de mercado é dado por uma função de demanda linear, como na Equação (1), do tipo:

$$p(q) = A - b(q_1 + q_2) \quad (1)$$

onde $p(q)$ é o preço de mercado como função da quantidade, q é a quantidade total produzida e vendida no mercado, A e b são constantes, q_1 é a quantidade produzida pela Solar 1 e q_2 é a quantidade produzida pela Solar 2. Logo, pela Equação (2),

$$q = q_1 + q_2 \quad (2)$$

A receita total de uma empresa é o produto do preço de mercado pela quantidade produzida. Segue-se que as receitas totais da Solar 1 (RT_1) e da Solar 2 (RT_2) são dadas, respectivamente, pelas Equações (3) e (4):

$$RT_1 = p(q)q_1 = Aq_1 - bq_1^2 - bq_1q_2 \quad (3)$$

$$RT_2 = p(q)q_2 = Aq_2 - bq_1q_2 - bq_2^2 \quad (4)$$

Para definir a função de recompensa de cada empresa, subtrai-se das receitas os custos, de forma a obter os lucros de cada empresa. Por simplificação, será adotado que as funções custo das duas empresas (C_1 e C_2) são idênticas, e dadas pelas Equações (5) e (6):

$$C_1 = cq_1 \quad (5)$$

$$C_2 = cq_2 \quad (6)$$

onde c é uma constante estritamente maior que zero. Na sequência, pode-se observar a função recompensa de cada empresa, ou seja, os lucros (π_1 e π_2) como sendo:

$$\pi_1 = Aq_1 - bq_1^2 - bq_1q_2 - cq_1 \quad (7)$$

$$\pi_2 = Aq_2 - bq_1q_2 - bq_2^2 - cq_2 \quad (8)$$

Em seguida, é realizada a primeira derivada de cada uma das Equações (7) e (8) em relação à q_1 e q_2 , respectivamente, e iguala-se à zero, de acordo com a condição de primeira ordem para maximização:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1} = A - 2bq_1 - bq_2 - c = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \pi_2}{\partial q_2} = A - bq_1 - 2bq_2 - c = 0 \quad (10)$$

Colocando q_1 e q_2 em evidência em nas Equações (9) e (10), respectivamente, tem-se duas novas equações:

$$q_1 = \frac{A - bq_2^e - c}{2b} \quad (11)$$

$$q_2 = \frac{A - bq_1^e - c}{2b} \quad (12)$$

As Equações (11) e (12) descrevem quanto cada uma das empresas irá produzir para maximizar seus lucros dada à produção esperada de sua concorrente. O fato de a quantidade produzida ser a esperada é indicado pelo sobrescrito e .

Utiliza-se a produção esperada porque cada empresa toma sua decisão sobre quanto produzir sem conhecer a decisão da outra empresa, por se tratar de um jogo simultâneo. As duas equações fornecem as funções de reação das empresas Solar 1 e Solar 2, respectivamente. A quantidade que a empresa irá produzir será sua melhor resposta à decisão que ela espera que sua concorrente tome.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Aplicação do modelo de Cournot com duas empresas

Hoje em dia, há várias possibilidades de aplicações da Teoria dos Jogos na comercialização de energia elétrica por um agente do setor, entre as quais se podem citar: a barganha competitiva, a barganha cooperativa de Nash, os modelos oligopolistas, entre outros. Cada uma delas pode ser usada para um determinado objetivo, como expansão na geração, participação em leilões de energia elétrica, elaboração de leilões para compra de equipamentos, dentre outras aplicações que variam à medida em que as regulações do mercado são determinadas. A aplicação desses conceitos, com a finalidade de maximizar o lucro de uma determinada empresa, geralmente não são publicados por motivos estratégicos.

Em tempo, será apresentado um exemplo hipotético de duas empresas (duopólio), Solar 1 e Solar 2, que utilizam o método de Cournot para exemplificar a maximização do lucro de ambas, utilizando o modelo para as duas empresas. Estas empresas não se cooperam, e possuem o mesmo custo marginal, ou seja, mesma tecnologia de produção e de acesso à energia. Dado que a função de demanda do mercado das empresas (P) é dada por:

$$P = 90 - Q \quad (13)$$

Considerando os custos marginais (c_1 e c_2) na Equação (14), tem-se:

$$c_1 = c_2 = 3 \quad (14)$$

E, neste caso, adotam-se os custos fixos iguais à zero. Primeiramente, deve-se adotar que $\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = 0$ e, a partir desta regra, é possível determinar quanto de energia cada empresa irá produzir para maximizar o lucro. Iniciando pela Solar 1, tem-se que o lucro é:

$$\pi_1 = R_{t1} - C_{t1} \quad (15)$$

$$R_{t1} = Pq_1 \quad (16)$$

$$C_{t1} = C_{F1} + C_{V1} \quad (17)$$

onde, R_{t1} e C_{t1} são a receita total e o custo total de Solar 1, respectivamente, e C_{F1} e C_{V1} são o custo fixo e o custo variável de Solar 1, respectivamente. Logo, substituindo as Equações (16) e (17) na Equação (15), tem-se:

$$\pi_1 = Pq_1 - (C_{F1} + C_{V1}) \quad (18)$$

De acordo com a Equação 13, tem-se que a demanda pode ser considerada pela quantidade que a empresa Solar 1 e Solar 2 irão produzir, isto pode ser representado pela Equação (19):

$$Q = q_1 + q_2 \quad (19)$$

Dado que o custo fixo é igual a zero, e o custo variável é igual ao custo marginal multiplicado pela quantidade de energia que cada empresa produz, tem-se que o lucro da Solar 1 está representado pela Equação (20), baseado na Equação (18):

$$\pi_1 = Pq_1 - (0 + 3q_1) \quad (20)$$

Realizando a fatoração dos termos, obtém-se:

$$\pi_1 = q_1(P - 3) \quad (21)$$

Realizando a substituição da Equação (13) na Equação (21), tem-se:

$$\pi_1 = q_1(90 - Q - 3) \quad (22)$$

Substituindo a Equação (19) na Equação (22), tem-se:

$$\pi_1 = q_1(90 - (q_1 + q_2) - 3) \quad (23)$$

Desenvolvendo:

$$\pi_1 = 87q_1 - q_1^2 - q_1q_2 \quad (24)$$

Encontrando o ponto de máximo da Equação (24), ou seja, derivando em relação à q_1 e igualando a zero, tem-se:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial q_1} = 87 - 2q_1 - q_2 = 0 \quad (25)$$

Organizando e isolando os termos, tem-se a função de reação da Solar 1:

$$q_1 = \frac{87 - q_2}{2} \quad (26)$$

Adotando que a empresa Solar 2, por analogia, é idêntica à Solar 1 por produzirem o mesmo produto, energia elétrica através da energia solar, e possuírem os mesmos custos marginais, pode-se adotar que a função de reação da Solar 2 será:

$$q_2 = \frac{87 - q_1}{2} \quad (27)$$

Realizando a substituição da Equação (27) na Equação (26), tem-se:

$$q_1 = \frac{87 - \left(\frac{87 - q_1}{2}\right)}{2} = 29 \quad (28)$$

Deve-se notar que este valor de q_1 representa a quantidade de energia que a Solar 1 deve produzir para maximizar o seu lucro dado à sua dependência com a Solar 2. Para encontrar o valor que a Solar 2 deve produzir de energia deve-se substituir o valor de q_1 na Equação (27):

$$q_2 = \frac{87 - q_1}{2} = \frac{87 - 29}{2} = 29 \quad (29)$$

Após encontrar as quantidades de energia que cada empresa deve produzir, deve-se encontrar o preço que custará a unidade de energia. Isso é obtido pelas Equações (19) e (13):

$$Q = q_1 + q_2 = 29 + 29 = 58 \quad (30)$$

$$P = 90 - Q = 90 - 58 = 32 \quad (31)$$

Através dos dados acima, é possível calcular o lucro de cada empresa. O mesmo é dado pela Equação (21):

$$\pi_1 = q_1 \cdot (P - 3) = 29 \cdot (32 - 3) = 841 \quad (32)$$

Pelo Teorema de Cournot, o lucro de cada empresa é igual, logo:

$$\pi_1 = \pi_2 = 841 \quad (33)$$

Na Tabela 1, é possível visualizar o resumo dos resultados encontrados no desenvolvimento deste trabalho:

Tabela 1 – Quadro Resumo dos resultados das empresas Solar 1 e Solar 2.

Item	Solar 1	Solar 2
Custos fixos (R\$)	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Custos marginais (R\$/kW)	R\$ 3,00	R\$ 3,00
Quantidade de energia produzida (kW)	29,0	29,0
Preço da energia vendida (R\$/kW)	R\$ 32,00	R\$ 32,00
Lucro (R\$/kW)	R\$ 841,00	R\$ 841,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das Equações (26) e (27), é possível calcular as respectivas quantidades de energia de cada empresa. Na Tabela 2, é possível visualizar as quantidades de energia produzidas.

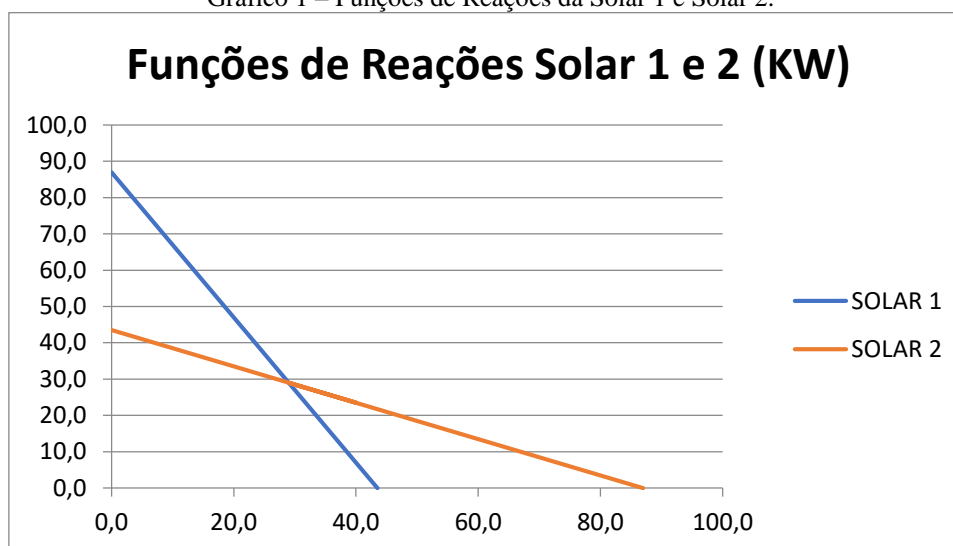
Tabela 2 – Dados das quantidades de energia produzidas pela Solar 1 e Solar 2.

Solar 1		Solar 2	
$q_1(\text{kW})$	$q_2(\text{kW})$	$q_1(\text{kW})$	$q_2(\text{kW})$
0,0	87,0	0,0	43,5
23,5	40,0	40,0	23,5
29,0	29,0	29,0	29,0
43,5	0,0	87,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 1, segue a representação gráfica das Funções de Reações das empresas Solar 1 e Solar 2.

Gráfico 1 – Funções de Reações da Solar 1 e Solar 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No momento que as empresas produzem a mesma quantidade de energia elétrica encontra-se o Equilíbrio de Cournot – Nash, neste ponto, ambas utilizam as funções de reação de melhor resposta para o mercado. A concorrência entre a Solar 1 e Solar 2, ou seja, duopólio, faz com que a quantidade de energia ofertada se exceda no mercado em relação à situação de um monopólio, isto é, apenas uma empresa produzindo energia para abastecimento. O preço da energia excede o custo marginal, porém é menor do que na situação de um monopólio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria dos Jogos pode ser utilizada em duas perspectivas distintas em um mercado de energia elétrica. A visão utilizada no presente trabalho foi de dois agentes que têm como objetivo escolher uma estratégia para sua atuação no mercado que maximize seu lucro.

Na situação hipotética apresentada, foi aplicada a Teoria dos Jogos para prever as estratégias de duas empresas, Solar 1 e Solar 2, com base em informações que elas dispõem sobre o mercado. O modelo utilizado foi o de Cournot, o qual está dentro do conceito de

Equilíbrio de Nash. Através deste modelo foi possível definir o preço e a quantidade de energia elétrica a ser ofertada para os consumidores.

A utilização do modelo de Cournot, neste caso hipotético, comprovou que o mercado está em equilíbrio, pois as empresas Solar 1 e Solar 2 escolheram maximizar seus respectivos lucros, tendo em consideração que nenhuma irá alterar o comportamento de oferta no mercado. Foi comprovado que o duopólio faz com que a quantidade de energia ofertada se eleve no mercado em contraposição a um monopólio, isto é, apenas uma empresa produzindo energia para abastecimento. Além disso, para esta configuração, o preço da energia é menor do que na situação de um monopólio, mesmo excedendo o custo marginal.

Dessa forma, pode-se concluir que a Teoria dos Jogos produz benefícios no processo de ensino e aprendizagem, favorecendo aspectos cognitivos e levando o ensino de forma diferenciada e lúdica.

REFERÊNCIAS

FIANI, Ronaldo. **Teoria dos Jogos**. 4ª edição, Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

FIGUEIREDO, R. S. (1994). **Teoria dos Jogos: Conceitos, Formalização Matemática e aplicação à Distribuição de Custo Conjunto**. Gestão e Produção (UFSCar), São Carlos, v. 1, n.3, 1994.

LANZOTTI, Carla Regina et Paulo de Barros Correia et Adriano Jeronimo da Silva. "**Comercialização de energia: experiências internacionais e brasileira**" in: anais do IX Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2002.

NEUMANN; J. v. & MORGENSTERN, O. **Theory of Games and Economic Behavior**. Princeton University Press, 1972.

USE OF THE THEORY OF GAMES AS AN INNOVATIVE METHOD IN THE SOLAR ENERGY INVESTMENT DECISION PROCESS

Abstract: *The present article aims to present the use of Theory of Games as an innovative method in the investment decision process between two companies of solar energy generation in the Brazilian northeast. The methodology used for this analysis was the Cournot method to conclude whether competition or cooperation among the agents involved prevails in the market.*

Key words: *Competition. Solar energy. Investment. Cournot Model. Theory of Games.*