

# Teoria dos Jogos: Estudo e Aplicação na Comercialização de Energia Elétrica

P. B. Correia, UNICAMP, E. M. Azevedo, UNICAMP e J. C. M. Nascentes, UNICAMP

## RESUMO

Este artigo é um produto do convênio firmado entre a Enersul e a Unicamp para o estudo dos conceitos e aplicação da teoria dos jogos na comercialização de energia elétrica.

Esse relatório tem caráter qualitativo explorando todo o tema em questão, porém sem o compromisso de apresentar resultados experimentais. Uma das conclusões a que este artigo chega é da necessidade que as empresas do setor têm de investir em ferramentas computacionais, embasadas no conteúdo conceitual aqui presente, que a auxiliem a atuar no ambiente competitivo do setor.

## PALAVRAS-CHAVE

Comercialização de energia elétrica, Mercados de energia elétrica, Teoria dos jogos.

## I. INTRODUÇÃO

No modelo antigo do setor elétrico brasileiro, quando as geradoras tinham que acatar o despacho de energia fornecido pela Eletrobrás, o mercado era compartilhado de forma consensual. O que se tinha era um monopólio regulado pelo governo, no qual não existia competição, pois para muitos fins, a eletricidade não possui um substituto. O problema de otimização a ser resolvido era o de minimizar os custos envolvidos com a geração, transmissão e distribuição de energia. O benefício dos geradores era dado pela tarifa (que era estipulada pelo governo para todo território nacional) multiplicada pela demanda e subtraída dos custos. A tarifa, por sua vez, era calculada pelo governo, já que não havia competição. Com isso as empresas não encontravam razões que as estimulassem a serem eficientes, pois por mais que os custos aumentassem, as tarifas também acompanhariam essa tendência.

Com a reestruturação, o setor elétrico passou a ser descentralizado. As geradoras, distribuidoras e comercializadoras estão começando a competir entre si. No modelo novo permanece o programa de otimização a ser resolvido para a definição de um despacho ótimo, porém este programa tem função adicional de calcular também os preços do mercado spot. As empresas que desejam expor-se ao preço spot contratam apenas uma parte da energia que irão consumir ou produzir, o restante automaticamente é liquidado no mercado spot.

Nesse contexto as geradoras competem 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. Portanto, o que se tem é um jogo de interesses cruzados, em que cada agente busca o máximo benefício, que não diz respeito simplesmente a fatia de mercado mas também ao lucro das empresas. Dessa forma o interesse de uma empresa geradora não se restringe simplesmente em aumentar sua participação no mercado através do acréscimo da produção de energia elétrica, pois o crescimento da demanda não depende do aumento da quantidade ofertada no mercado (com exceções de alguns casos específicos) e sim está mais relacionada com fatores sociais e macroeconômicos.

O aumento indiscriminado da oferta de energia, certamente levaria a uma queda em seus preços, podendo levar até ao fechamento temporário, ou até mesmo definitivo, das usinas geradoras mais ineficientes do respectivo sistema elétrico. No caso das empresas distribuidoras de energia elétrica, o problema não é apenas de venda de energia elétrica, mas também de compra. Além da disputa, através de preços e de serviços, com as outras distribuidoras e com os agentes comercializadores pelo mercado consumidor, existe também a preocupação de utilizar estratégias que as propiciem comprar energia, das empresas geradoras, a preços mais baixos possíveis.

Para determinar o tipo de jogo a ser praticado pelos seus agentes é necessário que se tenha conhecimento prévio das regras do jogo. Podem ser encontrados mercados de energia elétrica por toda parte do mundo, cada qual com suas características próprias. Existem os centralizados com um Power Exchange (PX), que dispendo dos lances dos geradores e da demanda determina o despacho físico. Há também os mercados descentralizados onde transações bilaterais são estabelecidas sem a intermediação de um órgão central.

No Brasil, os contratos bilaterais são feitos diretamente entre o fornecedor e o consumidor, num mercado totalmente descentralizado, em que cada contrato é realizado de acordo com os interesses das partes envolvidas e os preços são negociados livremente.

Também existe o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), no qual os participantes estão divididos em duas categorias, consumidores e produtores. Todos os agentes de geração, distribuição, comercialização e consumidores livres estão incluídos nessas duas categorias.

Atualmente o preço do MAE é determinado em base mensal ex-ante, ou seja, apurado antes de ocorrida a operação do sistema, levando-se em consideração os valores de

P. B. Correia é professor Dr. do departamento de energia da FEM/ UNICAMP (e-mail: pcorreia@fem.unicamp.br).

E. M. Azevedo é aluno de doutorado do departamento de energia da FEM/ UNICAMP (e-mail: azevedo@fem.unicamp.br).

J. C. M. Nascentes é aluno de mestrado do departamento de energia da FEM/ UNICAMP (e-mail: nascentes@fem.unicamp.br).

disponibilidade declarados de geração e consumo previsto de cada submercado. O preço é o maior valor entre os custos marginais das unidades geradoras, obtido com base na simulação energética com os modelos de preço sem restrição. Então, as instruções de despacho são encaminhadas para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Caso esse despacho não seja possível devido a restrições de transmissão, são despachadas usinas fora da ordem de mérito, podendo, nesse caso, ocorrer o aumento do preço calculado anteriormente pelo modelo computacional. No caso da Europa, as empresas não competem apenas a nível nacional, mas também com as dos outros países. Isso tem ocorrido com uma intensidade cada vez maior, especialmente nos países nórdicos.

## II. JOGOS ESTÁTICOS

Em suma, pode-se afirmar que os jogos estáticos são aqueles em que um determinado jogador só se movimenta em um único estágio, ainda que o jogo tenha mais de um.

Nos mercados de energia elétrica pode-se encontrar esta situação nos leilões de empreendimentos. No caso em que eles apresentarem mais de uma fase, pode-se considerar cada uma como um jogo diferente. É importante observar que nestes casos cada fase possui sua própria estratégia para atingir objetivos diferentes, o que não ocorre nos leilões repetitivos do mercado spot. Como exemplo pode-se imaginar que a empresa 1 quer comprar um determinado bem e formata um leilão para este fim, com o objetivo de que o preço deste bem seja o menor possível. É estipulado então um leilão de dois estágios. O primeiro com o formato de um leilão fechado e no segundo as duas firmas que apresentarem os preços mais baixos no primeiro estágio competem em um leilão descendente aberto. Fica evidente neste exemplo que as estratégias de lance e os objetivos, para uma firma que pretende participar deste leilão, serão diferentes entre o primeiro e o segundo estágio. Deste modo, seria conveniente tratar cada fase como um jogo de um único estágio. Já não pode-se afirmar o mesmo em relação a um leilão que ocorre com grande frequência com o mesmo formato.

Por parte do regulador, os modelos de oligopólio são modelos de jogos estáticos que podem ser utilizados para analisar o comportamento dos agentes de mercado em determinado estágio, averiguando se o prevalecente tem sido a cooperação ou a competição.

## III. JOGOS DINÂMICOS

Em um jogo dinâmico com estágios discretos, um número de jogadores estão tomando decisões estratégicas a cada estágio. A combinação das decisões de todos jogadores determina, através de um intermediário ou de um mercado descentralizado, a quantidade de bens comercializados entre os agentes, assim como os preços com os quais eles são comercializados, e então, os benefícios dos jogadores para o estágio. Uma aplicação imediata de jogos dinâmicos em mercados de energia elétrica se dá no mercado spot. Este possui uma estrutura dinâmica em que os agentes 'aprendem' quais são as oportunidades de mercado em uma

base definida (diária, horária, de trinta minutos, etc.) e calculam seus próximos lances através das estratégias assumidas, das informações disponíveis dos estágios passados e de seu custo operacional.

Neste caso o conjunto de informações disponíveis para cada jogador  $i$  no estágio  $t$  será seu conjunto de ações nos estágios passados ( $a_{i1}, \dots, a_{it-1}$ ), seu modelo de estratégias  $\theta_i$ , a história do jogo de conhecimento comum que são os preços de equilíbrio de mercado dos estágios passados assim como as quantidades comercializadas  $h_t$  e a crença dos modelos de seus oponentes  $\theta_{-i}$  dada por  $\mu_i(\theta_{-i} | \theta_i, h_t)$ . Lembrando que denota-se a probabilidade condicional para o jogador  $i$  de que os modelos de seus oponentes sejam  $\theta_{-i}$  por  $\mu_i(\theta_{-i} | \theta_i, h_t)$  definida para todos os jogadores  $i$ , datas  $t$ , histórias  $h_t$  e modelos  $\theta_i$ .

Outra aplicação possível para jogos dinâmicos em comercialização de energia elétrica é no caso dos contratos bilaterais negociados entre um único demandante e um único ofertante. Neste caso pode-se dar início a um processo de barganha em que ocorrem ofertas e contra-ofertas. Este processo pode ocorrer através de um mediador ou não, e pode ser um leilão fechado, ou de forma mais complexa, um jogo sequencial de barganha.

O processo de barganha apresenta outras vantagens, além de ser um mecanismo eficiente para comercializar energia elétrica. Uma delas é o aprendizado que esse mecanismo fornece quando é elaborado de forma racional, outra é que ele pode ser projetado de modo que objetive também a fidelidade dos clientes da empresa. O processo de barganha deve ser projetado para que possua o menor número de etapas possíveis, isto é, de ofertas e contra-ofertas, pois a demora da negociação contribui para que a mesma não ocorra. A não ser que a empresa possua opções que diminuam seu interesse em determinada negociação. Porém ainda que a negociação de um contrato não seja de interesse para uma empresa no presente, esta não deve conduzir um processo de barganha displicente, isto é, com muitas ofertas e contra-ofertas ou por um período longo de duração, o que poderia afetar a sua reputação para possíveis negociações no futuro.

A indução retroativa pode ser utilizada no mecanismo de barganha para negociação de contratos bilaterais. Neste caso o jogador fixa um preço equilíbrio que deseja alcançar e com base neste equilíbrio traça quais devem ser suas ofertas e contra-ofertas de modo retroativo até alcançar qual deve ser sua proposta no presente estágio. Fica claro que quanto maior o número de estágios, maior a probabilidade de não se alcançar o objetivo previsto. Outra observação que deve ser feita é que a indução retroativa requer que o jogo tenha informação perfeita, o que não ocorre neste caso, pois quando traça-se a história do jogo desde o último estágio até o primeiro, são atribuídas estratégias para o outro jogador que na verdade são expectativas de suas estratégias. Logo o que ocorre neste caso é uma indução retroativa com informação incompleta e o resultado deste jogo depende da exatidão da crença  $\mu_i(\theta_j | \theta_i, h_t)$  que o jogador  $i$  possui do jogador  $j$ , em que a história  $h_t$  deste jogo são todas as informações que o jogador  $i$  possui de negociações passadas com o jogador  $j$ .

Além do caso em que a negociação de contratos bilaterais acontece através de um jogo dinâmico, como foi abordado nos parágrafos anteriores. Quando esses contratos são de curto prazo, ainda que a condução da negociação não seja como um jogo dinâmico (jogo sequencial de barganha ou leilões de vários estágios) e sim através de um leilão estático de um único estágio, essas negociações se comportam como jogos dinâmicos. Pois por serem contratos de pouca duração, são negociados com uma alta frequência com as mesmas características o que possibilita que os jogadores desenvolvam um aprendizado sobre este jogo e acrescentem informações aos seus respectivos modelos a cada leilão.

#### A. Mercado spot

Em um mercado spot de energia elétrica a estratégia de lances de uma empresa depende principalmente dos seguintes fatores: de seu porte em relação ao mercado, da determinação do preço (preço único ou discriminatório), do modelo da empresa, de sua previsão da demanda, de seu custo operacional e de partida (principalmente no caso de termelétricas) e de sua disponibilidade.

O porte de uma empresa em relação ao mercado determina se ela é uma price maker, price taker. Uma firma price maker é aquela que possui uma parcela de mercado tal que suas estratégias influenciam substancialmente na formação do preço de mercado. Já a firma price taker detém uma parcela de mercado relativamente pequena em relação ao mesmo, logo ela não interfere diretamente na formação de preço do mercado. Existe também a possibilidade de uma colusão formar uma firma hipotética price maker. O caso em que o porte dos compradores e vendedores é insignificante em relação ao mercado e não existe colusão entre os agentes, denomina-se competição perfeita.

A forma como o preço de mercado ( $p$ ) é determinado influi nas informações que são disponibilizadas ao mercado através dos lances ( $l$ ) das empresas geradoras. No leilão de preço único, em que o preço de mercado é dado pela primeira oferta rejeitada, os participantes são estimulados a adotarem a estratégia de efetuar lances iguais ao custo ( $pc$ ). Uma vez que o preço de mercado sempre será superior ao valor das ofertas aceitas pelo leilão. Além disso, uma empresa que efetuar um lance superior ao seu custo, estará aumentando a probabilidade de ter sua oferta rejeitada. Neste caso com  $l = pc$  o benefício da empresa será  $p - pc > 0$  no caso de  $pc < p$ , e zero no caso em que  $pc \geq p$ . No leilão de primeiro preço uniforme, em que o preço de mercado é igual a última oferta aceita, as empresas possuem estímulos a efetuarem lances acima de seus custos. Pois a empresa que definir o preço de mercado terá benefício igual a zero, caso ofereça o seu custo, que é o mesmo benefício que têm as empresas cujas ofertas são rejeitadas. No leilão de preço discriminatório, em que as empresas cujos lances foram aceitos recebem um pagamento igual ao seu respectivo lance, as empresas tendem a ofertarem preços que se aproximem de suas respectivas expectativas de preço de mercado e possuem estímulos a nunca efetuarem lances iguais ao custo.

Como pôde ser observado, somente o leilão de preço

único possui uma estrutura teórica reveladora de custos. Porém considerando que as firmas são racionais e objetivam maximizar seus respectivos lucros, o que ocorre sob o ponto de vista estratégico é diferente. Como exemplo admita uma firma price maker e uma firma price taker 'competindo' no mercado spot. A firma price maker com posse de sua expectativa de demanda e da capacidade de sua rival, pode ofertar vários blocos de energia elétrica a um preço reduzido e com os outros blocos tentar construir o preço de mercado, ofertando-os com um valor elevado. Este comportamento elevaria o preço de mercado e consequentemente os rendimentos da empresa, ainda que não despachasse sua capacidade total. Já a firma price taker se limitaria a efetuar lances que não revelassem seus custos.

Porém esse comportamento não representa uma solução de equilíbrio, pelo contrário, ele se torna instável por dois motivos. Primeiro, é um comportamento que pode ser facilmente identificado pelo órgão regulador do mercado, uma vez que esse tiver acesso a todos os lances efetuados, o qual pode ser estimulado a atrair novas empresas para o mercado e até aplicar medidas antitruste. O segundo motivo são os novos empreendedores que seriam atraídos para o mercado pela expectativa de um lucro alto proveniente dos elevados preços em que a energia elétrica estaria sendo comercializada. Sendo assim, uma empresa price maker deve avaliar as consequências de suas estratégias na formação do preço de mercado.

O modelo de estratégias de uma empresa é confidencial. Nunca deve ser revelado nem explicitamente, nem implicitamente através de repetidos lances que não tenham a preocupação secundária de não sinalizar o que a empresa sabe e/ou acredite. Em um ambiente de informações incompletas, como é o caso do mercado spot, o modelo de uma empresa é baseado em distribuições de probabilidades que expressam suas respectivas crenças. As probabilidades também podem ser utilizadas no momento da escolha do lance a ser efetinado, com a finalidade de que a estratégia adotada por uma empresa não seja 'aprendida' com facilidade pelo modelo das demais empresas. Neste caso, o modelo de estratégias é constituído de valores de lances discretos aos quais são atribuídos probabilidades simples ou condicionais. Então no momento de definir o lance é gerado um número aleatório pertencente ao intervalo  $[0,1]$  que determina o valor como uma estratégia pura. É interessante observar que, embora em cada leilão seja definido um lance discreto, ao longo do tempo o lance resultante será uma estratégia mista, isto para cada modelo de probabilidades. O lance final ainda pode ser submetido a variações incrementais conforme a conveniência da estratégia adotada para o leilão. Estas variações devem ser tais que aumentem a probabilidade de vitória sem alterar substancialmente o benefício esperado.

Também podem ser implementados nos modelos das empresas, algoritmos de inteligência artificial que sejam capazes de auxiliar na construção crenças a respeito do mercado com base na história  $ht$  que o jogo possui no estágio  $t$ .

A previsão da demanda varia muito de acordo com as características do mercado e dos consumidores. Em um mercado de energia residual, como o que ocorre na Bovespa,

a previsão pode estar mais apoiada em um ambiente de jogos. Já em um mercado que define o despacho de um sistema de transmissão, a previsão da demanda se apoia mais em aspectos técnicos. Neste caso ocorre a necessidade que exista no lado da demanda consumidores estratégicos. Estes seriam grandes consumidores que teriam a opção de comprar energia elétrica no mercado spot ou de gastar seu estoque. Certamente, este estoque não se refere a energia elétrica armazenada, mas sim a reservatórios de água, de combustíveis ou calor que seriam utilizados para gerar energia elétrica em ocasiões em que o preço da energia elétrica atingisse determinado nível. Neste caso a demanda aumentaria sua elasticidade fazendo com que a energia elétrica fosse comercializada a preços menores.

Os custos operacionais e de partida assim como a disponibilidade de cada gerador são aspectos técnicos. Os custos não devem ser revelados, porém a disponibilidade precisa ser declarada com antecedência em alguns mercados e é fiscalizada pelo órgão regulador, pois o controle sobre a disponibilidade pela empresa se constitui em uma oportunidade para controlar o preço de mercado. Porém esse controle pode ser posto em prática por uma empresa através da oferta de preços como foi abordado nos parágrafos anteriores, pois um bloco de energia elétrica ofertado a um preço muito acima da expectativa do mercado pode ter efeito equivalente a uma declaração de indisponibilidade.

## B. Mercado bilateral

O ponto de partida para o jogador *i* aplicar a teoria dos jogos dinâmicos em uma negociação de um contrato bilateral, é construir um modelo para o comportamento do jogador *j*. Todas as crenças do jogador *i* ( $\mu_i$ ) em relação ao comportamento do jogador *j* estarão baseadas neste modelo ( $\theta_j$ ). Como foi abordado anteriormente, esta crença será uma probabilidade condicional ( $\mu_i(\theta_j | \theta_i, ht)$ ) que apontará qual será a expectativa para o comportamento do jogador *j* dado o modelo do jogador *i* ( $\theta_i$ ) e a história que ele possui a respeito de negociações passadas com este jogador (*ht*).

Como exemplo assumamos que o jogador *i* pretende vender energia elétrica e o jogador *j* comprar. As conclusões para o caso do comprador são recíprocas.

O próximo passo será o jogador *i* com base em  $q_j$  definir uma faixa para os possíveis preços da energia elétrica em um intervalo de probabilidades  $[0, 1]$ . Assim para cada preço existirá uma probabilidade correspondente que expresse a disposição do jogador *j* em concretizar a comercialização. Quanto mais informações o jogador *i* possuir e quanto melhor for o seu modelo, maior será a fidelidade com que o modelo para o jogador *j* representará a realidade. De forma análoga o jogador *i* com base em seu próprio modelo  $q_i$  define uma outra faixa de preços no mesmo intervalo de probabilidades  $[0, 1]$ , só que desta vez cada preço corresponderá a uma probabilidade que expresse sua própria disposição em vender energia elétrica ao respectivo preço. É importante observar que a quantidade (MWh) e forma de consumo devem estar bem definidas, pois para cada custo do jogador *i* existirá um modelo de preços diferente.

O próximo passo para o jogador *i* será definir a proposta inicial no caso de um jogo sequencial de barganha, ou definir o lance no caso de um leilão fechado. Neste ponto, sempre estará presente o 'conflito' entre rentabilidade e risco, isto é, para cada valor pertencente ao intervalo dos possíveis preços existirá uma rentabilidade e uma probabilidade da comercialização ocorrer associados crescendo em direções opostas, no modelo do jogador *j* elaborado pelo jogador *i*. Quanto maior a rentabilidade que um determinado valor proporcionar ao jogador *i*, menor será a probabilidade dele conseguir comercializar energia ao respectivo preço.

## C. Jogo sequencial de barganha

Neste item será dado continuidade ao anterior considerando que a negociação entre os jogadores *i* e *j* ocorrerá através de um jogo sequencial de barganha.

Desta forma, o passo seguinte para o jogador *i* será definir um preço de equilíbrio em que este almeje vender energia elétrica. Assim ele poderá traçar através da indução retroativa o caminho para alcançar este suposto equilíbrio, isto é, utilizando do modelo elaborado para o jogador *j* definir quais serão as ofertas e contra-ofertas do jogo. Lembrando que: quanto maior este caminho (número estágios, ou de ofertas e contra-ofertas), maior a probabilidade de não ser atingido o valor pretendido; existe a tendência de quanto mais esta proposta estiver distante do valor de equilíbrio, maior deverá ser o número de estágios do jogo; e quanto maior o número de estágios, maior a probabilidade da negociação não ocorrer. Desse modo o jogador *i* define qual será sua proposta inicial para o jogador *j*. Caso em algum estágio da negociação a contraproposta do jogador *j* seja diferente da prevista (considerando um intervalo de incerteza) pela indução retroativa, o jogador *i* poderá reavaliar sua estratégia de ofertas.

Existe também o caso em que o jogador *j* faz a proposta inicial, neste caso o jogador *i* possuiria uma informação adicional. Porém isto não significa que seja melhor para o jogador *i* esperar por uma proposta ou não, pois isto vai depender de alguns aspectos de seu oponente tais como: informações que o jogador *i* possui a respeito de *j*, no caso de poucas ou de ausência total de informações talvez fosse melhor para o jogador *i* obter mais informações recebendo uma proposta inicial; e do modo como o jogador *j* elabora suas propostas, racionalmente utilizando modelos ou displicentemente.

Outro ponto a ser analisado pelo o jogador *i* é a viabilidade de serem elaboradas medidas que visem incentivar a fidelidade de clientes. Essas medidas podem ser aplicadas de modo implícito através de um processo de barganha amistoso, ou explicitamente através de cláusulas contratuais que facilitem a renovação de contratos e/ou de outras formas.

Em um jogo sequencial de barganha que pode se repetir no futuro, como é o caso dos contratos bilaterais de comercialização de energia elétrica, devem ser levados em consideração também os efeitos na reputação. Como exemplo a pode-se citar que a flexibilidade no processo de barganha causa um efeito positivo na reputação do jogador *i*, em contrapartida uma negociação não concluída pode causar um efeito negativo.

#### D. Leilão fechado

Neste item será dado continuidade ao sub-item B considerando que a negociação entre os jogadores *i* e *j* acontecerá através de um leilão fechado de vários estágios.

Neste caso, em que dois jogadores estão negociando o preço do contrato, ocorreria um leilão duplo, ou seja, cada jogador revelaria o preço pelo qual estaria disposto a comercializar simultaneamente. Caso o lance *lv* do vendedor (jogador *i*) for inferior ao lance *lc* do comprador (jogador *j*) o preço será  $p = (lv + lc) / 2$ . Caso contrário não ocorrerá negociação. Este leilão pode ser formatado em um único estágio, com um número limitado de estágios, ou com um número indeterminado de estágios, isto é, até que a comercialização ocorra ou uma das partes desista. Para cada uma dessas formatações, existem estratégias diferentes. O leilão de um único estágio não se caracteriza como um jogo dinâmico, por isso foi abordado no item sobre jogos estáticos.

O leilão com um número indeterminado de estágios é o que mais se assemelha com o jogo seqüencial de barganha, porém com uma diferença fundamental. No leilão fechado os jogadores efetuam os seus lances simultaneamente em cada estágio, na barganha os jogadores alternam-se em seus lances, isto é, em cada estágio apenas um jogador efetua um lance ou concorda com o último lance de seu oponente. Sendo assim, no leilão os jogadores estão menos informados no momento do lance. Pois existe a preocupação das duas partes de que o seu lance encontre o do oponente sem que o ultrapasse sensivelmente, o que diminuiria seu benefício da metade do valor ultrapassado. Isto não ocorre explicitamente no jogo seqüencial de barganha.

No leilão com um número limitado de estágios, os jogadores possuem basicamente duas fases distintas com estratégias diferentes. Na primeira fase, que acontece nos estágios iniciais, cada jogador possui uma preocupação maior em adquirir informações a respeito de seu oponente além de tentar conduzir o leilão a um equilíbrio que lhe seja favorável. A segunda fase acontece no momento em que os jogadores efetuam lances com o objetivo de atingir um preço comum.

#### IV. TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Os jogos de informação completa são aqueles em que o benefício de cada jogador é de domínio público. Também pode ser considerado de informação completa o jogo em que os participantes possuem todas as informações necessárias para definir suas respectivas estratégias. Muitos modelos de estratégias utilizam-se desta segunda definição para transformarem um jogo de informação incompleta em um jogo de informação completa. Alguns modelos, de uma forma mais simplificada, utilizam apenas variáveis de conhecimento comum em suas formulações. Outros, possuem variáveis desconhecidas em suas formulações que são estimadas por modelos de probabilidades.

Nos mercados de energia elétrica não existem jogos com informação completa, uma vez que as funções de custo e de avaliação de cada empresa são informações confidenciais.

Porém devido as adaptações feitas nos modelos de estratégias, os jogos que necessitam de informação completa, como a indução retroativa, podem ser aplicados nestes mercados.

Na grande maioria dos jogos de informação incompleta o benefício de cada jogador é uma informação sigilosa. Isto é exatamente o que ocorre nos mercados de energia elétrica, nos quais é necessário transformar os jogos de informação incompleta em jogos de informação completa através de modelos que preencham os espaços vagos pela falta de informação. Geralmente isso é implementado através de distribuições de probabilidade, que é conhecido como método Bayesiano ou de Bayes.

#### V. PODER DE MERCADO

Poder de mercado é a habilidade de uma empresa ou grupo de empresas de controlar o mercado em seu favor, seja através da influência nos preços seja através da maior capacidade de penetração de mercado, obtendo mais clientes ou clientes mais lucrativos.

A desregulamentação do mercado de eletricidade quebra o monopólio integrado vertical, cria um mercado horizontal e reduz o poder de mercado. Mesmo assim, ainda permanece um grau de poder, que dependerá de como o mercado como um todo 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. A escassez pode ser não só de energia como também de serviços ancilares, como por exemplo, potência reativa. Assim, provedores de serviços ancilares também podem deter poder de mercado.

##### A. Comportamento da firma estratégica

São focalizadas aqui as estratégias de otimização de lucros de empresas geradoras, considerando dois comportamentos básicos: o daquelas que possuem uma participação dominante numa determinada região de fornecimento e o daquelas que possuem participação secundária. Busca-se mostrar como as empresas devem utilizar o conhecimento do seu poder de mercado local, para definir suas estratégias de oferta.

A desregulamentação de um setor elétrico monopolizado e a quebra do monopólio visando criar competição, tem o efeito geral de dividir o sistema em submercados, ou regiões geográficas, com restrições de transmissão, podendo criar um mercado oligopolista. Dentro de cada submercado podem haver empresas com mais ou menos poder de mercado local.

Neste quadro, uma geradora pode possuir, num determinado local, uma participação dominante ou secundária.

O poder dominante de uma geradora local está associado à sua capacidade de fornecer energia com custos marginais mais baixos do que as empresas mais distantes daquele submercado. Uma participação secundária está associada ao fornecimento com custos maiores, sendo a

causa mais provável os custos de transmissão. Uma geradora secundária pode atender ao excesso de demanda na área em que a geradora dominante não tenha plena capacidade de atendimento. Uma geradora atuará, provavelmente como dominante na sua área geográfica e como secundária em outras áreas.

Para uma geradora dominante, uma estratégia de liderança de preços é o meio mais efetivo de maximizar os lucros. Ela tem a oportunidade de determinar o preço como função de quanta eletricidade ela deseja suprir naquela área. A geradora secundária não tem participação de mercado para influenciar o preço. A sua estratégia é utilizar o preço já determinado pela geradora dominante e determinar a quantidade que otimiza seus lucros àquele preço determinado.

A maximização dos lucros é obtida no ponto em que a receita marginal da empresa é igual ao custo marginal.

Desta forma a geradora dominante dará os seguintes passos para realizar a sua otimização:

- Determinar a função de demanda (quantidade demandada em função do preço)
- Determinar a curva de suprimento de todos os outros competidores.
- Determinar a função de demanda da geradora dominante como a diferença entre os valores anteriores.
- Calcular a função de receita total da geradora dominante (preço vezes a quantidade) com base na função anterior de demanda e calcular a receita marginal.
- Determinar a função de custo marginal da geradora dominante.
- Igualar as funções de custo marginal e receita marginal e determinar a quantidade  $Q$ .
- Para determinar o preço, utilizar a função de demanda da geradora dominante, obtida no terceiro passo e a quantidade obtida no passo anterior. Se a dominante oferecer um preço superior ao calculado, os consumidores migrarão para os competidores. Se oferecer um preço inferior, estará perdendo oportunidade de obter um lucro maior.

Portanto, o conhecimento do poder de mercado permite à geradora dominante determinar os preços e quantidades que levam ao máximo lucro, compatível com o grau de poder que ela detém, autorizado pelo órgão regulador.

A geradora secundária toma o preço como dado. Substitui o preço na sua função de custo marginal e determina a quantidade produzida.

### B. Restrições de transmissão

As restrições de linhas de transmissão isolam os submercados da competição de agentes localizados fora destes submercados. O objetivo aqui é examinar o tipo de competição oligopolística que tem lugar nestes submercados.

Tanto quanto o conhecimento do próprio poder de mercado, considerando este mercado como um todo, é importante para a empresa o conhecimento das influências da transmissão, para que possa tirar partido da mesma ou evitar que os concorrentes o façam, se for o caso,

atuando através do regulador ou influenciando no planejamento da transmissão.

Um aspecto do efeito da transmissão é que um reduzido número de agentes, isolados num submercado pela restrição de transmissão, pode aumentar o preço da energia. Outro aspecto é que a transmissão oferece oportunidade de jogos para alguns participantes.

Geradores em áreas restritas por linhas de transmissão fracas, com limites apertados, têm seu poder de mercado aumentado.

Este poder existe por causa das limitações de fluxo nos laços das malhas de transmissão, ditados pela distribuição destes fluxos em função das impedâncias, da configuração da rede e pelas restrições de capacidade na transmissão. Este poder pode ser temporário e pode variar geograficamente.

## VI. CONCLUSÕES

No que diz respeito a teoria dos jogos uma conclusão imediata é que a confecção de um conjunto da história do jogo é a base para qualquer tipo de análise. Os principais elementos desse conjunto são as ações de todos jogadores em cada estágio do jogo.

A Indução Retroativa é um método em que o jogador determina um equilíbrio que ele deseje atingir, e de posse das informações sobre o outro jogador ele trace qual o caminho de estratégias para chegar ao seu objetivo (estratégia do estágio 0, 1, ... , n). Esse método tem aplicação direta na negociação de contratos bilaterais.

No mecanismo de barganha o vendedor e o comprador negociam através de ofertas e contra-ofertas o produto, que pode ser um contrato bilateral também.

Deste modo, a teoria dos jogos tem aplicação direta em mercados competitivos de energia elétrica. E, essa aplicação concorre para a eficiência desses mercados.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Fudenberg, J. Tirole, "Game Theory", Cambridge, MA, The MIT Press, 1991.
- [2] A. F. Mendonça "The Brazilian electrical system reform", Energy Policy 27, 73-83, 1999.
- [3] F. Bolle "Competition with supply and demand functions" Energy Economics 3, 253-277, 2001.
- [4] R. W. Ferrero, J. F. Rivera, S. M. Shahidehpour "Application of games with incomplete information for pricing electricity in deregulated power pools" IEEE - Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, 184 - 189, 1998.
- [5] G. B. Sheblé "Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation" Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1999.