

XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**UM NOVO ENFOQUE PARA A COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA
ELÉTRICA EM AMBIENTE COMPETITIVO**

JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA AIRES
ALEXANDER FELDMANN
MARCO ANTONIO ARAUJO
LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A.

LEONTINA MARIA V.G. PINTO
MANUEL FREITAS
ENGENHO

Foz do Iguaçu, 19 a 23 de Novembro de 2000

RESUMO

A nova realidade do setor elétrico muda radicalmente as relações entre os produtores e os consumidores de energia elétrica. Antes consideradas prestadoras de serviços, as empresas do setor agora produzem, transportam e distribuem um *produto* – como uma commodity. Por seu lado, os consumidores deixam de ser usuários do antigo serviço para transformarem-se em clientes (grandes ou pequenos) das companhias.

Nesse ambiente, não basta possuir os melhores recursos: é necessário utilizá-los bem para lograr os melhores resultados para a empresa. A informação precisa e correta passa a ser uma aliada inestimável. Desnecessário seria falar da necessidade de técnicas matemáticas modernas no tratamento desta informação para dar à empresa a potencialidade de antecipar-se à concorrência e conquistar uma posição de liderança no mercado

Fica evidente a importância da utilização de modelos e ferramentas computacionais de análise e síntese sob incertezas, capazes de responder eficientemente às necessidades do mercado, representando corretamente o sistema físico, o comportamento dos agentes econômicos e os modelos legais e regulatórios para a livre competição.

Este trabalho apresenta um modelo para a comercialização da energia elétrica em um ambiente competitivo voltado para a realidade brasileira. O modelo proposto pode ser também utilizado para a construção de um portfólio de produtos e clientes, colocando o produto “energia elétrica” no mercado, nas condições mais vantajosas para os clientes e mais lucrativas para a Empresa. Podem ser incluídas distintas modalidades de comercialização, como contratos a médio e longo prazo, bolsas, futuros, opções, etc.

As ferramentas propostas incorporaram as técnicas mais modernas de tratamento de incertezas como a teoria dos conjuntos incertos (fuzzy sets) além do tratamento da competitividade através da teoria dos jogos. As restrições elétricas e a confiabilidade do fornecimento são representadas através de um modelo de otimização que maximiza o desempenho do sistema e minimiza os custos associados, calculando os correspondentes custos marginais de operação e expansão

Para ilustrar o modelo de comercialização é apresentado um estudo de real de competição entre concessionária e novos agentes com a utilização do software Gambit, versão 0.96 (<http://hss.caltech.edu/~gambit/Gambit.html>).

PALAVRAS-CHAVE

Comercialização de Energia, Mercado Competitivo, Teoria dos Jogos, Teoria dos Portifólios

UM NOVO ENFOQUE PARA A COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTE COMPETITIVO

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. O AMBIENTE INSTITUCIONAL	3
3. ACESSO À REDE ELÉTRICA	4
3.1 TARIFAÇÃO DA REDE.....	4
3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO	5
4. PLATAFORMA DE COMERCIALIZAÇÃO	6
4.1 ESTRUTURA DA PLATAFORMA	6
4.2 MODELAGEM DOS CUSTOS E ESTRATÉGIAS	6
4.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE.....	7
5. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TEORIA DOS JOGOS.....	7
5.1 CONCEITOS BÁSICOS	7
5.2 MATRIZ DE PAGAMENTOS.....	8
5.3 PONTOS DE EQUILÍBRIO DO JOGO.....	9
5.4 NATUREZA DOS PAGAMENTOS.....	9
5.5 ESTRATÉGIA MISTA	9
6. EXEMPLO DE COMPETIÇÃO.....	9
6.1 FORMULAÇÃO DO JOGO	9
6.2 A SOLUÇÃO DO JOGO.....	10
6.3 CONSIDERAÇÃO DE UMA TARIFA ELEVADA	10
6.4 ESTRATÉGIAS MISTAS.....	11
6.5 O IMPACTO DAS INCERTEZAS.....	12
7. MODELO DE COMERCIALIZAÇÃO.....	12
8. CONCLUSÕES.....	13
9. REFERÊNCIAS.....	13

—

1. INTRODUÇÃO

A nova realidade do setor elétrico muda radicalmente as relações entre os produtores e os consumidores de energia elétrica. Antes consideradas prestadoras de serviços, as empresas do setor agora produzem, transportam e distribuem um *produto* – como uma commodity. Por seu lado, os consumidores deixam de ser usuários do antigo serviço para transformarem-se em clientes (grandes ou pequenos) das companhias.

Nesse ambiente, não basta possuir os melhores recursos: é necessário utilizá-los bem para lograr os melhores resultados para a empresa. A informação precisa e correta passa a ser uma aliada inestimável. Desnecessário seria falar da necessidade de técnicas matemáticas modernas no tratamento desta informação para dar à empresa a potencialidade de antecipar-se à concorrência e conquistar uma posição de liderança no mercado

A oferta do produto energia elétrica segue, como em outros setores, as regras de mercado. É preciso examinar a estrutura de custos da empresa e suas filosofias de comercialização, o perfil e os requerimentos do cliente e a atuação da competição de modo a colocar no mercado o melhor produto (ou o melhor portfolio de produtos) aos melhores preços e condições mais atraentes ao consumidor. Entretanto, diferentemente de muitos outros setores, as incertezas envolvidas na comercialização da energia elétrica são tremendas. Por exemplo, o crescimento da demanda em uma economia instável como a brasileira é uma das maiores fontes de incertezas (e possivelmente de problemas). O comportamento do consumidor e suas escolhas e preferências em um mercado desregulado são ainda desconhecidos. A desregulamentação do setor, ainda recente, traz um componente de incertezas à captação de investimentos e conseqüentemente à expansão. Finalmente, o mercado livre é ainda jovem, e os mecanismos de competição ainda não estão suficientemente maduros para que as estratégias de cada empresa possam ser consideradas previsíveis ou minimamente conhecidas.

Neste contexto, fica evidente a importância da utilização de modelos e ferramentas computacionais de análise e síntese *sob incertezas*, capazes de responder eficientemente às necessidades do mercado, representando corretamente o sistema físico, o comportamento dos agentes econômicos e os modelos legais e regulatórios para a livre competição.

Deve-se notar que não existem ainda, nem a nível internacional, instrumentos capazes de responder a este desafio, principalmente em mercados ainda jovens, sem históricos confiáveis ou previsões consistentes no que se refere tanto à evolução do sistema quanto ao comportamento dos agentes.

Este trabalho tem como objetivo analisar o problema da comercialização da energia elétrica e propor um modelo para a sua solução voltado para a realidade brasileira. O modelo proposto pode ser utilizado para a construção de um portfolio de produtos e clientes, colocando o produto “energia elétrica” no mercado, nas condições mais vantajosas para os clientes e mais lucrativas para a Empresa. O modelo identifica as necessidades dos clientes (por exemplo, quanto à quantidade e qualidade da energia fornecida), as “vocações” da empresa (os melhores nichos de atuação no mercado), as possíveis alianças mais vantajosas e as melhores estratégias de competição. Podem ser incluídas distintas modalidades de comercialização, como contratos a médio e longo prazo, bolsas, futuros, opções, etc.

As ferramentas propostas podem incorporar ainda técnicas mais modernas de tratamento de incertezas como a teoria dos conjuntos incertos (fuzzy sets) além do tratamento da competitividade através da teoria dos jogos. As restrições elétricas e a confiabilidade do fornecimento são representadas através de um modelo de otimização que maximiza o desempenho do sistema e minimiza os custos associados, calculando os correspondentes custos marginais de operação e expansão. Um modelo econômico global, que combina a análise de riscos e os jogos empresariais, avalia os riscos econômico/financeiros e define as estratégias de mercado mais atraentes e eficientes para a empresa. Em resumo, o modelo pode atuar como um instrumento que integra a análise e síntese de decisões para a produção, investimentos e comercialização do produto “energia elétrica”.

2. O AMBIENTE INSTITUCIONAL

Com o objetivo de viabilizar as primeiras solicitações de acesso à rede elétrica, em 1993 foi criado o Sistema Nacional de Transmissão de Energia Elétrica - SINTREL, que congrega os sistemas de transmissão das empresas subsidiárias da ELETROBRAS.

O Decreto Nº 1009 de 22/12/93 que criou o SINTREL, instituiu as bases para o faturamento das transações de transporte de energia elétrica, através da Portaria do DNAEE Nº 337/94, de 22/01/94.

A Lei Nº 9074 de 07/07/95 oficializou as Medidas Provisórias da Lei de Concessões (Lei Nº 8987 de 13/02/95), introduziu a figura do Produtor Independente de Energia Elétrica (PIE) e abriu para a iniciativa privada a possibilidade de aproveitar os potenciais hidráulicos ou construir termelétricas.

Para assegurar aos fornecedores e respectivos consumidores, livre acesso aos sistemas de distribuição e transmissão, a rede elétrica brasileira foi dividida em quatro segmentos:

- Rede Básica
- Transmissão de interesse exclusivo dos centros de geração
- Transmissão de âmbito próprio das concessionárias de distribuição
- Rede de distribuição.

A Rede Básica passou a ser o principal elemento na viabilização da competição na geração e na comercialização da energia elétrica a ser transportada.

A Lei 9.648, de 28 de maio de 1998, estabelece que a compra e venda de energia elétrica deverá ser contratada separadamente do acesso e do uso dos sistemas de transmissão e distribuição. É determinado que transações de energia elétrica nos sistemas elétricos interligados, serão realizadas no âmbito do Mercado Atacadista de Energia Elétrica – MAE e que as atividades de coordenação e controle da operação da geração e transmissão de energia elétrica nos sistemas interligados, serão executadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

O Decreto nº 2.655, de 2 de julho de 1998, regulamenta o MAE, define as regras de organização do ONS e institui as condições gerais de contratação do acesso aos sistemas de transmissão e de distribuição. Define também que as tarifas correspondentes deverão assegurar tratamento não discriminatório aos usuários, estimular novos investimentos na expansão dos sistemas, induzir a utilização racional dos sistemas e minimizar os custos de ampliação ou utilização dos sistemas elétricos.

Relativamente ao uso e acesso à rede elétrica destacam-se as seguintes resoluções da ANEEL:

1. Resolução nº 247, de 16 de agosto de 1999, altera as condições gerais da prestação de serviços de transmissão e contratação do acesso, compreendendo os Contratos de Prestação do Serviço de Transmissão - CPST, Contratos de Uso dos Sistemas de Transmissão - CUST e dos Contratos de Conexão ao Sistema de Transmissão - CCT, vinculadas à celebração dos Contratos Iniciais de Compra e Venda de Energia Elétrica.
2. Resolução nº 281, de 04 de outubro de 1999, estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.
3. Resoluções nº 282 e 286, de 04 de outubro de 1999, estabelecem as tarifas de uso das instalações de transmissão de energia elétrica, componentes da Rede Básica, e dos sistemas de distribuição de energia elétrica, respectivamente.

3. ACESSO À REDE ELÉTRICA

3.1 Tarifação da Rede

Em ambientes em que os investimentos em geração e na rede transmissão/distribuição são feitos por diferentes agentes, os principais custos envolvidos nas análises econômicas são os custos de investimento e de operação do sistema, além dos encargos de uso da rede elétrica. Assim, se as tarifas de uso dos sistemas elétricos refletirem os custos acarretados por cada agente na expansão da rede, os agentes serão levados a tomar decisões de investimento que coincidem com os da expansão a custo mínimo

A Figura 1 apresenta um sistema elétrico sendo compartilhado por uma empresa de geração, uma distribuidora e um agente privado. A empresa possui os geradores nas barras 2 e 3, utilizados para atender à demanda D na barra 4. O agente privado, por sua vez, tem uma geração própria de W MW na barra 1, utilizados para atender uma carga também de W MW na barra 4.

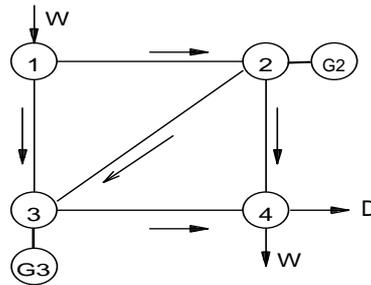


Figura 1 - Problema de Acesso à Rede Elétrica

O uso compartilhado do sistema pela empresa geradora, pela distribuidora e pelo agente privado é a opção mais econômica. A questão é *como* repartir os custos desta rede entre os participantes de uma maneira *equitativa*. Em termos de teoria econômica, uma alocação de custos é equitativa se cada participante paga *menos* como usuário do sistema compartilhado do que ele pagaria se decidisse construir seu próprio sistema, ou se associar a outros participantes. Em outras palavras, esta alocação deve incentivar a *estabilidade* da associação para o uso dos recursos.

3.2 Metodologia de Cálculo

Dentre as diversas metodologias disponíveis para a tarifação do transporte da energia elétrica em redes de transmissão/subtransmissão e distribuição [1-4], a metodologia conhecida como *tarifação nodal* [5,6] é a que foi adotada pela ANEEL para subsidiar as transações de transporte da Rede Básica por permitir a remuneração dos investimentos e produzir sinais econômicas para os Agendados usuários da rede (geradores e consumidores).

Na metodologia Nodal, cada usuário, gerador ou consumidor, paga encargo de uso do sistema de transmissão relativo ao ponto (nó) da rede de transmissão na qual está conectado. Assim sendo, o encargo de transmissão devido a um agente de geração é função apenas de sua localização na rede elétrica, independente de onde estejam localizados os consumidores que comprarão sua energia gerada. O mesmo raciocínio aplica-se aos agentes consumidores, cuja tarifa nodal independe da localização das centrais geradoras das quais comercializam a sua energia.

Para o caso de sistemas de subtransmissão fora da Rede Básica, utiliza-se ainda o conceito de Tarifação Zonal [6] e para as redes de Distribuição considera-se como base do cálculo das tarifas o método *postage-stamp*.

De acordo com as referências [5] e [6] o modelo nodal pode ser mostrado pelo modelo abaixo:

$$T(g) = \text{Min} \sum_{j=1}^n \frac{c_j}{f_j} x f_j \quad (k)$$

Sujeito a

$$f_j = \sum_{i=1}^m (B_{ji} x g_i) - \sum_{k=1}^m (B_{jk} x d_k), \quad i=1, \dots, n \quad (3.1)$$

onde B_{ij} é o fator de sensibilidade do fluxo do circuito j com relação a uma injeção na barra i .

A formulação (3.1) é utilizada no cálculo da tarifa nodal, que é dada por:

$$\pi_i = \frac{\partial T(g)}{\partial g_j} \quad (3.2)$$

onde:

- π_i é a tarifa nodal
- C_j custo do i -ésimo circuito
- m número de barras
- g vetor de geração (m -dimensional)
- d vetor de cargas (m -dimensional)
- $T(g)$ custo total do serviço de transmissão para o vetor de gerações g
- y_i variável de decisão de construir o i -ésimo circuito
- n número de circuitos candidatos

f vetor de fluxos de potência nos circuitos
 \bar{f} vetor de capacidade dos circuitos

4. PLATAFORMA DE COMERCIALIZAÇÃO

4.1 Estrutura da Plataforma

A Figura 2, apresenta uma plataforma para a comercialização de energia elétrica, definida pelos módulos básicos descritos a seguir [15, 16].

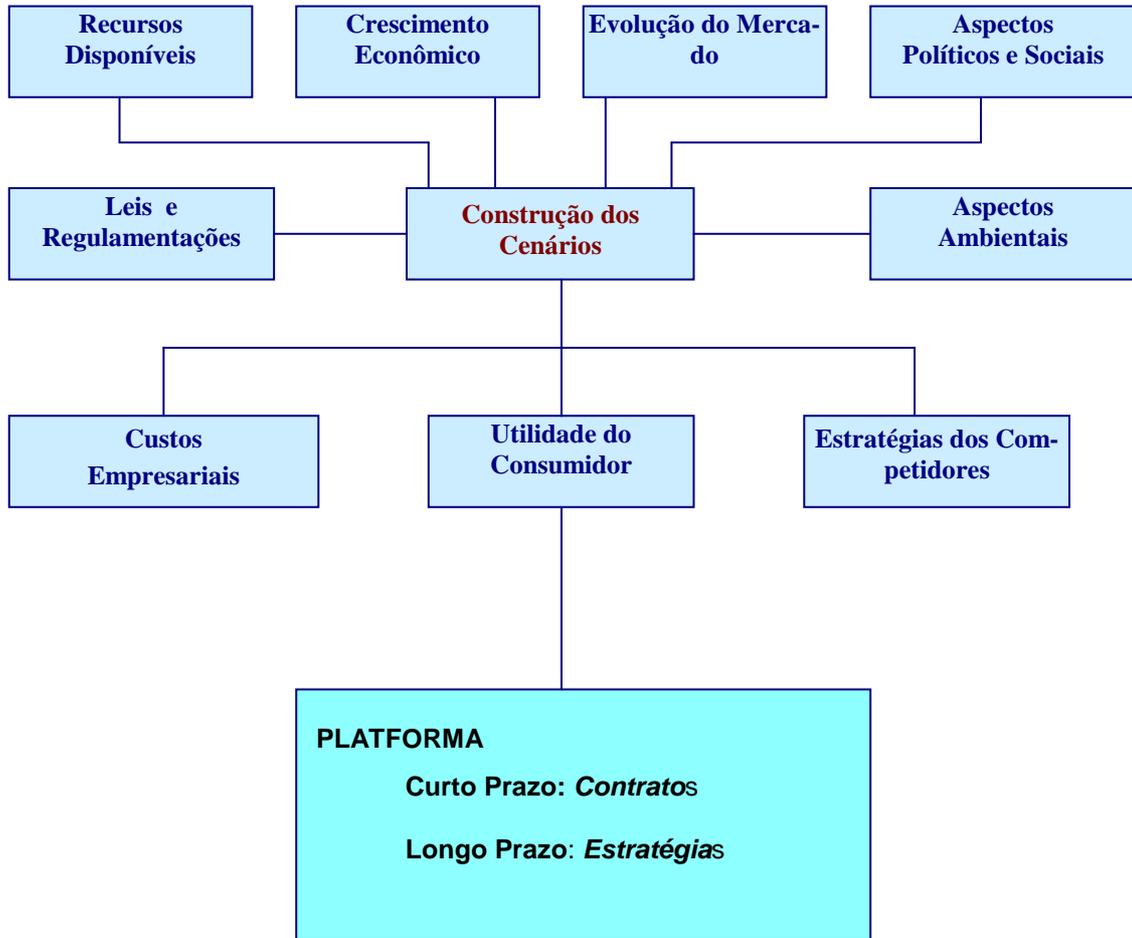


Figura 2 - Plataforma de Comercialização

4.2 Modelagem dos Custos e Estratégias

As incertezas associadas aos custos de produção, às curvas de utilidade dos consumidores e às estratégias de preços podem ser representadas pelas curvas abaixo:

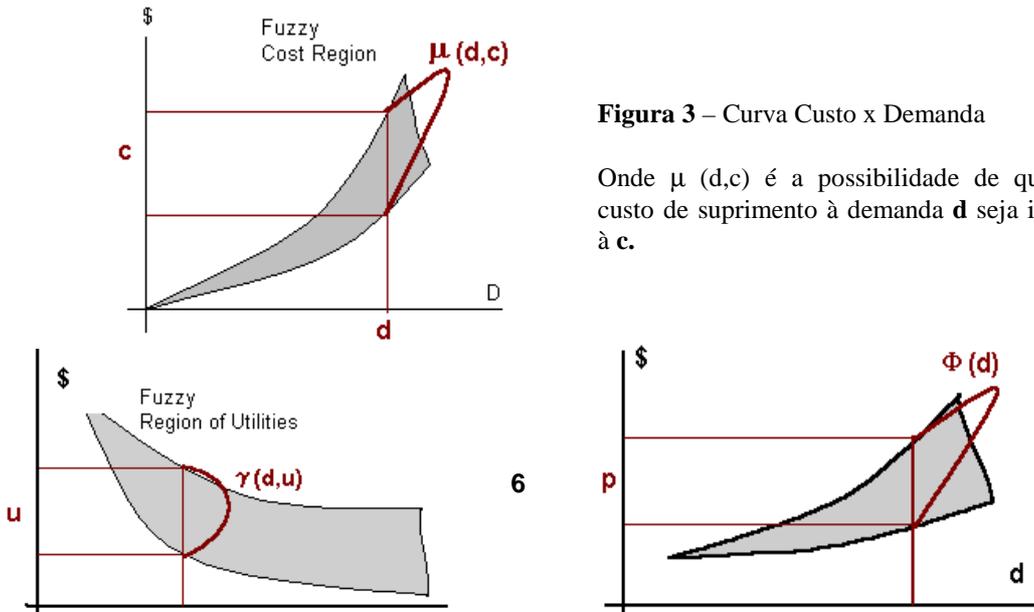


Figura 3 – Curva Custo x Demanda

Onde $\mu(d,c)$ é a possibilidade de que o custo de suprimento à demanda d seja igual a c .

Figura 4 – Função de utilidade do consumidor

Figura 5 – Possibilidades de Regiões de preços

4.3 Ferramentas de Análise

O problema do portfólio pode ser visto como a divisão ótima de um total de recursos disponíveis em diferentes segmentos, de forma a obter a máxima utilidade total. Alguns dos exemplos clássicos incluem as carteiras de investimentos, que buscam o "balanço ótimo" entre diversas aplicações (por exemplo, ações, fundos, etc.), ou as carteiras de clientes/produtos, que buscam definir os melhores "nichos" de mercado, encontrando os produtos e preços mais adequados para o melhor desempenho da empresa.

As aplicações mais conhecidas da teoria do Portfólio a problemas reais baseiam-se geralmente em variantes da teoria da Mínima Variância de Markowitz [7]. O objetivo destes modelos é otimizar o portfólio (ou a segmentação) de forma a minimizar os riscos totais da aplicação (medida pela variância da utilidade conseguida).

Uma forma alternativa de modelar o problema do portfólio ótimo é através da conhecida Teoria dos Jogos [4], amplamente utilizada para resolver problemas estratégicos - desde ações de guerra a investimentos financeiros. A utilização da teoria dos jogos na escolha de estratégias para investimentos, produção e comercialização de produtos tem crescido dia a dia. As referências [8,9] introduzem os conceitos básicos destas aplicações detalha matematicamente os modelos resultantes.

Os modelos baseados na Teoria dos Jogos apresentam a vantagem de trabalhar com *possíveis cenários* - as distintas estratégias que podem ser seguidas pela empresa e por seus concorrentes, além de explicitar claramente as ações da concorrência, simplificando a análise dos resultados e a tomada de decisões.

Pelas razões apresentadas, optou-se pela utilização da teoria dos jogos para a obtenção do portfólio ótimo. A próxima seção resume os princípios básicos da teoria e sua aplicação ao problema da comercialização de energia elétrica.

5. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TEORIA DOS JOGOS

A teoria dos jogos é um método para analisar situações de conflitos e de cooperação que dependem do comportamento estratégico, onde as ações dos agentes são parcialmente dependentes do que os outros agentes poderão fazer. O objetivo da Teoria dos Jogos (TJ) é determinar a melhor estratégia para um jogador supondo que o oponente é racional e fará um lance inteligente.

A análise matemática dos jogos tem o seu início em 1921 com uma rápida nota apresentada por Emile Borel. Contudo os fundamentos da TJ foram apresentados por John Von Neumann que em 1928 demonstrou o *teorema minimax básico*.

5.1 Conceitos básicos

Para melhor situar os conceitos supõem-se dois jogadores: as concessionárias estatais (CE) e os novos agentes (NA) [10]:

Jogo: é uma situação entre N pessoas ou grupos, chamados jogadores, que é conduzido por um conjunto prévio de regras. As regras definem atividades elementares, ou lances diferentes, mas cada um conhece os lances realizados pelos outros.

Jogo de soma zero: uma das partes perde, exatamente o que a outra ganha. A parcela do mercado cativo que as CE perdem é exatamente o que os NA ganham.

Estratégia: uma estratégia simples é um plano pré-determinado que um jogador adota para uma seqüência de lances e contra-lances no decorrer de um jogo completo. As estratégias dos dois

jogadores são as variáveis de decisão; para as CE: {cooperar ou não cooperar}; para os NA: {cooperar ou não cooperar}.

Estratégia dominante: é aquela que seja ideal para um jogador independentemente do que possa fazer seu oponente.

Matriz de pagamentos: é a caracterização completa do jogo, onde cada jogador seleciona suas estratégias:

	CE1	CE2
NA1	g_{11}	g_{12}
NA2	g_{21}	g_{22}

Onde:

NA_i - i-ésima estratégia dos novos agentes

CE_j - j-ésima estratégia das concessionárias

g_{ij} - payoff ou ganhos dos NA sobre as CE, quando os NA utilizam sua i-ésima estratégia e as CE utilizam sua j-ésima estratégia.

Com a nova regulamentação do Setor Elétrico Brasileiro, as negociações entre as concessionárias e entre as concessionárias e outros agentes relacionados com o Setor (Produtores Independentes, Cogeneradores, Consumidores Livres, etc), constituem um jogo cooperativo, onde as empresas podem negociar contratos entre si, permitindo planejar estratégias comuns. Com as mudanças em curso, poderão ocorrer jogos não-cooperativos, sendo necessário a intervenção do Agente Regulador para evitar situações de conflitos.

5.2 Matriz de Pagamentos

Suponhamos que um administrador A, desejoso de aumentar suas vendas, tenha três alternativas: a_1 , lançar um novo produto; a_2 , intensificar a propaganda; a_3 , esperar pelo aumento da demanda. Agora ele tem que levar em consideração a possível resposta de seu concorrente C, que, digamos, possui quatro alternativas: c_1 , encetar uma promoção de vendas; c_2 , ampliar o território de vendas; c_3 , baixar os preços; c_4 , construir nova fábrica com equipamento moderno.

Como, num jogo de soma nula, as perdas de um competidor são exatamente iguais aos ganhos do outro, podemos representar o resultado de cada par de decisões por um único algarismo; o conjunto dos resultados será uma matriz de pagamentos, expressa, por exemplo, em \$ de unidades monetárias (um) a favor do administrador A, conforme o quadro abaixo:

Alternativa	c_1	c_2	c_3	c_4
a_1	0,6	-0,3	1,5	-1,1
a_2	0,7	0,1	0,9	0,5
a_3	-1,3	0,0	-0,5	0,8

Categoria importante de jogos é aquela dos que possuem ponto de equilíbrio. Demonstra-se que nesse tipo de jogo, o único critério razoável para cada oponente é o de tentar minimizar suas perdas. Haverá ponto de equilíbrio quando um mínimo numa linha for o máximo de uma coluna.

De fato, se A escolher a_1 , a resposta mais inteligente de C será c_4 , que levará A a perder -1,1; se A escolher a_2 , a melhor resposta de C será c_2 , que limitará o ganho de A a 0,1; se A escolher a_3 , C responderá com c_1 , que causará a A um prejuízo de 1,3. Logo, A deve escolher a_2 , pois garante assim um ganho de 0,1.

Se C escolher c_1 , A retrucará com a_2 e ganhará 0,7; se C escolher c_2 , A rebaterá com a_2 e ganhará 0,1; se C escolher c_3 , A revidará a_1 , e ganhará 1,5; se C escolher c_4 , A poderá escolher a_3 , e ganhará 0,8. Logo, B deve escolher c_2 , que limita os ganhos de A a 0,1.

5.3 Pontos de Equilíbrio do Jogo

Estabelecida a matriz dos pagamentos, deve-se primeiro procurar, para solucionar o jogo, se existe, como no exemplo anterior, um par de alternativas, uma para cada adversário, que garanta a um jogador uma perda mínima e ao outro um ganho mínimo. Quando o jogo comporta esse par de alternativas, diz-se que ele possui um *ponto de equilíbrio*. O ponto de equilíbrio no exemplo precedente corresponde ao cruzamento na linha a_2 com a coluna c_2 .

5.4 Natureza dos Pagamentos

Os pagamentos que figuram na matriz dos jogos, no exemplo dado, representam valores que serão recebidos ou desembolsados com certeza, para cada par de ações seguidos pelos dois jogadores. Os pagamentos também podem ser representados por percentagens do mercado conquistado, retorno percentual sobre vendas ou outras utilidades.

Observa-se que, para haver jogo de um lance, as decisões de ambos os jogadores devem ser tomadas simultaneamente, ou em sucessão imediata, de maneira que o segundo jogador não conheça (ou conheça de maneira muito vaga) a escolha feita pelo primeiro jogador. Ambos conhecem, por hipótese, a matriz de pagamentos.

5.5 Estratégia Mista

Em muitos jogos simples, não existe um ponto de equilíbrio; neste caso, pode ser provado que se atinge o equilíbrio usando uma *estratégia mista*, constituída pela ponderação aleatória de duas alternativas puras. Esta afirmativa constitui o Teorema de Von-Neumann.

Os campos militar e esportivo oferecem numerosas situações que se reduzem a um conflito de dois adversários, de soma zero, com um lance e duas alternativas.

6. EXEMPLO DE COMPETIÇÃO

6.1 Formulação do Jogo

O problema aqui descrito pode ser visto como um jogo, onde uma Indústria com uma demanda de 100MW pode ser atendida pela Concessionária local e por um Produtor Independente de Energia (PIE). No caso, os dois fornecedores de energia elétrica são competidores (jogadores) e podem vender a energia de acordo com as faixas abaixo:

Concessionária (C):

$$\min = 45\$/MW \text{ e } \max = 50\$/MW$$

Produtor Independente (G) - custo da geração + custo de transporte:

$$\min = 48\$/MW \text{ e } \max = 52\$/MW$$

As empresas podem optar por duas estratégias PB (Preço Baixo) ou PA (Preço Alto). O resultado da opção por cada uma das estratégias gera quatro possíveis cenários para a concorrência, cujos resultados são sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulação do Jogo

Estratégia (Jogador=Preço)	Ganho E	Ganho C	Comentários
C=PB, G=PB	45x50	48x50	Dividido
C=PB, G=PA	45x100	0	C ganha
C=PA, G=PB	0	48x100	G ganha
C=PA, G=PA	50x50	52x50	Dividido

Este mesmo jogo pode ser representado através da forma clássica, ou *forma normal do jogo*, pela matriz a seguir, onde a concessionária C é o jogador linha, a companhia G é o jogador coluna, e o ganho de cada jogador para cada um dos cenários oriundos das combinações das possíveis estratégias mostrado em cada célula correspondente sob a forma (C,G)

	G ↓
PB	PA

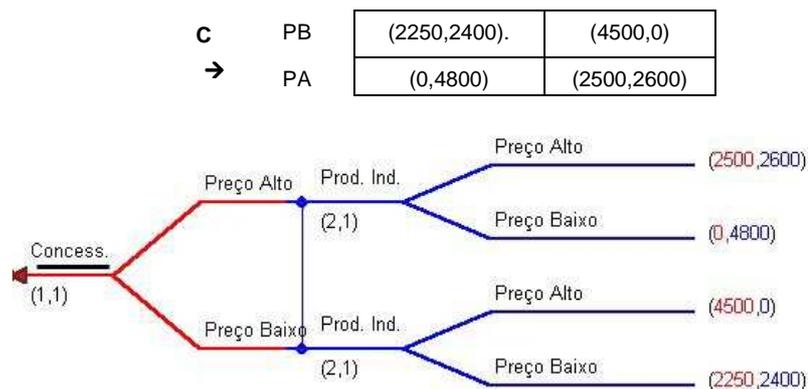


Figura 6 – Forma gráfica do Jogo 1

6.2 A Solução do Jogo

Toda a filosofia dos modelos para a solução de jogos baseia-se na busca de *pontos de equilíbrio* - definidos como situações, ou cenários, onde nenhum jogador mudaria sua posição desde que seus competidores também não o façam. Em outras palavras, se um ponto de equilíbrio é alcançado, e $n-1$ jogadores se mantiverem nele, o jogador n também não mudará sua estratégia sob pena de prejuízos.

É importante notar que o ponto de equilíbrio não significa, necessariamente, o ponto de maior ganho dos participantes - nem mesmo da soma, ou da média, ou de algum participante. Esta afirmação pode ser comprovada através do exemplo estudado. Um dos pontos de equilíbrio do jogo é o cenário onde os dois jogadores escolhem a estratégia de preços baixos, que lhes proporciona um ganho igual a (2250,2400); pode-se observar que, se um dos jogadores mudar sua estratégia e aumentar os preços, perde o mercado e a receita. Por exemplo, se a concessionária aumentar o preço, ela perderá o mercado e o PIE terá uma receita de 4800. Por outro lado, se o PIE aumentar o preço, a receita da Concessionária será de 4500.

A inspeção do jogo mostra que existe outro cenário onde ambos os competidores optam pela estratégia de preços altos. Novamente o mercado é dividido, onde o ganho dos competidores é de 2500 para a Concessionária e de 2600 para o PIE. Esse ponto entretanto não é um ponto que equilíbrio já que se o PIE utilizar a estratégia de preço alto, a concessionária poderá participar com preço baixo com um ganho de 4500.

Esse jogo é chamado de **Jogo Dominado** pela Estratégia de preço baixo, onde a retirada da 2ª linha da matriz não altera o resultado do Jogo já que a concessionária nunca participará com preços altos sabendo que sempre ganhará o jogo com preço baixo. Já o PIE, sabendo que a Concessionária apresentará preços baixos, também participará com preços baixos. O ponto (2250,2400) é também denominado de *Equilíbrio de Nash* ou equilíbrio estratégico.

A opção por uma das estratégias não parece ser uma tarefa simples, e é importante notar que não há garantia de que, uma vez tomada a opção pelo pontos de equilíbrio, o competidor jogue no mesmo ponto (a menos dos jogos cooperativos). Por exemplo, se os dois jogadores escolhem estratégias associadas a equilíbrios diferentes, o que "apostou" no preço alto pode amargar uma derrota. Este problema é particularmente difícil em mercados, onde a falta de experiência leva ao desconhecimento das preferências dos outros competidores e a possíveis erros de avaliação.

6.3 Consideração de uma tarifa elevada

Para ilustrar a possibilidade de um novo ponto de equilíbrio, considerou-se uma terceira estratégia onde os dois competidores participariam com uma tarifa extremamente elevada, como mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Jogo com tarifa elevada

Estratégia (Jogador=Preço)	Ganho C	Ganho G	Comentários
C=PB,G=PB	45x50	48x50	Dividido
C=PB,G=PM	45x100	0	C ganha
C=PB,G=PA	45x100	0	C ganha
C=PM,G=PB	0	48x100	G ganha

C=PM,G=PM	45x50	48x50	Dividido
C=PM,G=PA	45x100	0	C ganha
C=PA,G=PB	0	48x100	G ganha
C=PA,G=PM	0	48x100	G ganha
C=PA,G=PA	120x50	120x50	Dividido

Forma normal do jogo2

		G ↓		
		PB	PM	PA
C →	PB	(2250,2400)	(4500,0)	(4500,0)
	PM	(0,4800)	(2500,2600)	(4500,0)
	PA	(0,4800)	(0,4800)	(6000,6000)

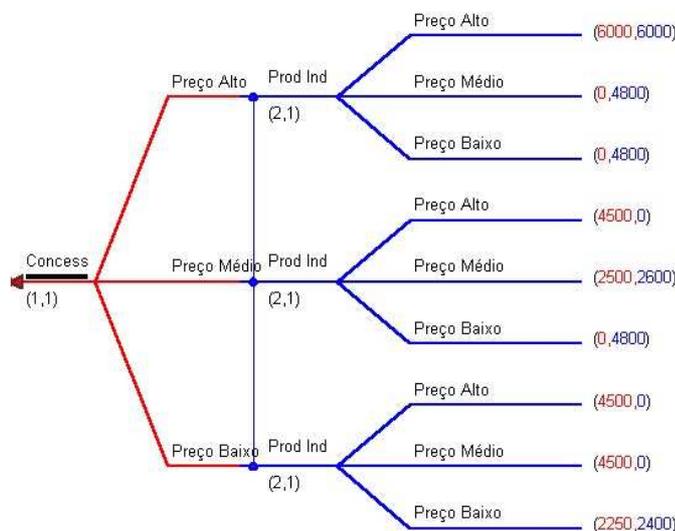


Figura 7 – Forma gráfica do Jogo 2

O resultado é que existem dois pontos de equilíbrio de Nash:

1- os dois competidores com preços baixos (2250, 2400) - este é o equilíbrio de mercado, como reza a teoria da competição.

2- os dois competidores com preços altíssimos (6000, 6000) - este é o equilíbrio de coalizão, típico de mercados dominados por poucos agentes que combinam entre si as estratégias para tirar o máximo lucro.

Qual dos pontos se adota? Ninguém sabe direito. A tendência é que em uma competição acirrada, o mercado tende para o primeiro (preço baixo). Se de alguma forma os competidores chegarem a um acordo, o mercado vai para o preço alto. Isto é o que normalmente acontece no Brasil, por exemplo, em mercados com poucos agentes (carros, eletrodomésticos, etc.). O papel da agência reguladora está exatamente aí: não deixar que se formem as coalizões predatórias.

6.4 Estratégia Mista e Portifólio

A escolha entre as opções de preços alto e baixo, estudadas anteriormente, é conhecida como uma *estratégia pura* - isto é, os jogadores optam por apenas uma dentre as possibilidades. Uma alternativa, que poderia aliar a segurança do preço baixo à lucratividade do preço alto, seria a *estratégia mista* - onde os competidores tomam alternadamente uma das duas opções.

O jogo de estratégias mistas é representado pela matriz abaixo, onde a empresa C oferece a preço baixo $p\%$ do tempo e G oferece a preço baixo $q\%$ do tempo. Evidentemente neste jogo admite-se que existirá não uma mas várias concorrências, ou várias possibilidades de negócios, e espera-se que as empresas

sigam uma estratégia mista de modo a combinar possíveis opções, numa tentativa de compensar riscos e lucros.

Um exemplo de estratégia mista seria (resultado do programa Gambit):

Jogador 1: 95.8% do tempo em preço baixo e 4.2% do tempo em preço alto

Jogador 2: 96.1% do tempo em preço baixo e 3.9% em preço alto.

Isto configura um portfólio. Por exemplo, a concessionária ofereceria seu produto a preço baixo a 95.8% dos clientes e a preço alto a 4.2% dos clientes (provavelmente os de menor interesse - ou porque são espalhados, ou porque não pagam bem, etc.). Idem para o jogador. 2.

		G ↓	
		PB (<i>q</i>)	PA (<i>1-q</i>)
C	→ PB (<i>p</i>)		
	→ PA (<i>1-p</i>)		

O equilíbrio num jogo de estratégia mista segue o mesmo princípio: corresponde a um ponto onde, se nenhum competidor mudar de estratégia, não há incentivo para que o jogador mude a sua. No caso particular de dois jogadores e duas estratégias, o equilíbrio pode ser calculado de forma imediata [11,12,13].

6.5 O Impacto das Incertezas

Sabe-se que as incertezas produzem um grande impacto nos resultados de uma empresa, e a sua correta modelagem é fundamental para a qualidade do resultado obtido por qualquer ferramenta.

Pode-se imaginar, por exemplo, que a empresa *C* tem um parque gerador misto (hidráulico e térmico) e que o ganho associado à estratégia de preço baixo depende do regime hidrológico do sistema. Na estratégia de preço alto, considera-se que o preço corresponde ao preço de oportunidade, e mantém-se constante, já que não depende das afluências às usinas de *C*. O jogo correspondente a este problema é da forma $([a,b],c)$, onde $[a,b]$ denota o intervalo de possibilidades de ganhos associados a cada estratégia.

		C ↓	
		PB (<i>q</i>)	PA (<i>1-q</i>)
C	→ PB (<i>p</i>)	([a,b],c)	
	→ PA (<i>1-p</i>)		

7. MODELO DE COMERCIALIZAÇÃO

O Modelo final para a comercialização da energia elétrica pode ser resumido nos seguintes passos [11]:

Definição dos Índices de Qualidade do Negócio

A empresa define, segundo suas filosofias e objetivos, um *índice de qualidade* pelo qual será medido o sucesso do negócio. Este índice pode tomar uma ou uma ponderação das variáveis de interesse, como lucro esperado, risco admitido, máximo prejuízo admitido, etc.

Definição das Possíveis Estratégias

Com base na experiência, conhecimento e/ou expectativas, definem-se as possíveis estratégias de comercialização das empresas e seus competidores.

Construção do Jogo

Conhecidas as possíveis estratégias, calculam-se as distribuições de possibilidades (e não de probabilidades) dos custos e lucros associados a cada estratégia. Estas distribuições são obtidas através de modelos baseados na teoria de *fuzzy sets* descrita em [12], e podem ser utilizadas para obter, com qualquer precisão desejada, todos os índices de qualidade de negócio requeridos.

Solução do Jogo

Os índices de negócio assim obtidos são então utilizados para construir a matriz de jogos, que será resolvida através dos algoritmos apropriados. Ressalta-se a possibilidade de utilização da nova geração de modelos da Teoria dos Jogos, como os *Evolutionary Games* e *Bounded Rationality Games* [14,15]

8. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um modelo para a comercialização da energia elétrica sujeito às incertezas do setor. e que combina as teorias matemáticas e econômicas de última geração para obter uma representação realista do sistema e oferecer ao agente de decisão um auxílio preciso e confiável.

Muitas das ferramentas e mencionadas ao longo do trabalho podem também ser utilizadas em estudos de planejamento do sistema elétrico. Alguns pontos marcantes da evolução desses estudos foram:

- décadas de 70 e 80 - necessidade de substituição de conceitos determinísticos por probabilísticos e utilização de técnicas de otimização;
- início da década de 90 pela necessidade de incorporação de incertezas através da utilização do critério minimax e dos fuzzy sets

As recentes mudanças do modelo institucional não descartam as metodologias anteriores mas impõem a necessidade de nova evolução para permitir uma melhor análise do comportamento do mercado em ambiente de competição.

A Plataforma Proposta no artigo foi desenvolvida pela Engenho¹ e aborda todas as técnicas mencionadas.

9. REFERÊNCIAS

- [0] Aires, J. C. O, Feldmann, A, Araújo, M.A. & Pinto, L; Freitas, M. *Um Novo Enfoque para a Comercialização a Energia Elétrica em Ambiente Competitivo*. XIV SENDI, Foz do Iguaçu, 19 a 23 de novembro de 2000
- [1] Aires, J. C. O, Araújo, M. A, J.C.O.Mello, Gorenstin, B. G., Marcato, A. L. M. & Castro, A. L. *Pedágio em Redes de Subtransmissão e Distribuição - Experiência da LIGHT*, SUCE (Subcomite de Comercialização de Energia do CIER), Novembro, 1996.
- [2] Aires, J. C. O, Pinto, L. M. V. G, Guimarães, A. V. & Cancela, J. A. *Custos Marginais de Transformação e Subtransmissão*, XIII SENDI, São Paulo, 18 a 23 de maio de 1997.
- [3] Leontina M.V.G. Pinto, *Tarifação da Geração a Custos Marginais*, Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia - ELAB, 1996.
- [4] Araújo, M. A; Gorenstin, B. G, Berer, R. et alii, *Cálculo do Pedágio na Transação de Transporte de Energia Elétrica Através dos Sistemas de FURNAS e LIGHT Envolvendo a CPFL e a VALESUL*, VI ERLAC, Foz de Iguaçu, 1994.
- [5] Araújo, M. A & Aires, J. C. O. *Delimitação de Zonas Nodais para Tarifação de Transporte de Energia Elétrica em Redes de Subtransmissão*. A ser apresentado no VII Seminário de Planejamento Econômico-Financeiro do Setor Elétrico – SEPEF, setembro de 1999.
- [6] Pereira, M.V.F. *Cálculo de Tarifas Nodais de Transmissão*. PUC, Novembro de 1998.
- [7] Von Neumann, J. & Morgenstern, O. *Theory of Games and Economic Behaviour*. John Wiley & Sons, 1944.
- [8] Dixit, A. & Nalebuff, B. *Thinking Strategicall*. W. Norton and Company, 1993.
- [9] Davis, M. D. *Game Theory – A Nontechnical Introduction*. Dover Publ., 1983
- [10] Morozovski, Filho, M. & Schuch, G. B. *Novo Enfoque para Planejamento de Sistemas Elétricos em Ambiente Competitivo*, V SEPOPE, Recife, Maio de 1996.
- [11] Pinto, L; Ribeiro, A., *A Comercialização da Energia Elétrica: Construção do Portifólio de Produtos e Clientes*, XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), 1999.
- [12] Pinto, L; Freitas, M; A. Ribeiro & Fernandez, O. *Modelos de Análise de Riscos: Uma Nova Classe de Ferramentas*. XV SNPTEE, 1999.
- [13] Aires, J. C. O, Araújo, M.A. & Pinto, L. *A Comercialização da Energia Elétrica: Construção do Portifólio de Produtos e Clientes*. VII Seminário de Planejamento Econômico-Financeiro do Setor Elétrico – SEPEF, setembro de 1999.

¹ Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria LTDA.
Rua Esther Scliar, 70. Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, RJ. CEP 22793-760
Tel/Fax (55 21) 325-7054 e-mail leontina@uol.com.br

- [14] Pinto, L. & Aires, J. C. O. *A Platform for Energy Business Administration*. VII SEPOPE, Curitiba, Maio, 2000.
- [15] Pinto, L; Freitas, M. & Aires, J. C. O. *Evolutionary Games and the Electrical Energy Market*. PMAPS, Ilha da Madeira, Outubro, 2000.