



Grupo de Estudo de Comercialização, Economia e Regulação do Mercado de Energia Elétrica-GCR

Poder de mercado na formação de preços via oferta: análise de fatores de influência e métricas.

FERNANDO PAPPAS(1); MARCELO LUIS LOUREIRO DOS SANTOS(2);
ABIAPE(1);ABIAPE(2);

RESUMO

Ao fim da década de 1980 e no início da década de 1990 no Brasil, investiu-se no desenvolvimento de modelos de otimização para auxiliar e prover transparência à atividade de planejamento da operação. Com a liberalização do mercado de energia elétrica no país, em meados da década de 1990, tais modelos passaram a ser utilizados também na emulação do mercado físico, em um paradigma de mercado conhecido como formação de preços explícita via modelo (também conhecido como *tight pool*). Com uma série de justificativas, a implantação desse paradigma foi realizada em oposição a outros mais populares, em funcionamento na grande maioria dos demais mercados. Atualmente, no entanto, as condições para que o paradigma escolhido possa funcionar de forma satisfatória têm sido questionadas, levando a discussões sobre a sua substituição. Embora não seja a única alternativa, a formação de preços explícita via oferta (*loose pool*) tem sido foco de atenção, cuja compreensão em profundidade tem exigido pesquisas em desenho de mercado. Nesse contexto encontram-se as contribuições deste artigo nas formas de estudos e ferramentas. Inicialmente, modelos simplificados são utilizados para estudar a influência da quantidade de agentes e da contratação bilateral-financeira no poder de mercado. Embora possam ser utilizados para esclarecer alguns fenômenos, o modelo simplificado mostra-se limitado a problemas simples. De modo a possibilitar análises mais sofisticadas é apresentado um modelo de otimização de dois níveis para representar a competição (jogo) entre os agentes.

PALAVRAS-CHAVE

Formação de preços por oferta, oferta de preços, poder de mercado, equilíbrio de mercados competitivos, otimização multinível

1.0 - INTRODUÇÃO

Os mercados de energéticos possuem dois tipos de produtos: físicos e financeiros. Os mercados de produtos físicos negociam a *commodity* energia com o objetivo de entrega física em um momento determinado. O mercado financeiro tem o papel de prover instrumentos para gestão de risco aos agentes físicos, permitindo também algum grau de especulação. Enquanto os mercados financeiros tendem a encontrar soluções com base nas necessidades do mercado, os mercados físicos precisam ser formalmente definidas a priori (dadas características particulares da *commodity* energia elétrica). Essa definição será tratada por paradigma de mercado.

Simplificadamente, podem ser encontrados dois principais paradigmas de mercados físicos ao redor do globo ([1] e [2]): o bilateral¹ (também conhecido por formação de preços implícita ou descentralizada) e o *pool* (formação de

1 Onde a negociação de produtos físicos é livre, incluindo na forma bilateral. Nesse caso, todos os contratos

preços explícita ou centralizada), o qual tem dois subtipos: por oferta de preços² (*loose pool*) e por modelo³ (*tight pool*). Observe-se que o termo “por oferta” tem o significado de “por declaração”, ou seja, cada agente declara um valor para compra/venda ao mercado, não tendo relação com a oferta no sentido de “os agentes com disposição a vender”.

O paradigma em uso no Brasil é a formação de preços explícita por modelos. Assim, as ofertas de preço são substituídas por custos cujo cálculo é definido regulatoriamente e todos os agentes físicos (geração e consumo) devem estar representados no modelo de otimização que determina o encontro das curvas de oferta e demanda de todo o mercado. O processo é realizado pela CCEE com base em premissas associadas à oferta e à demanda (fornecidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS), assim como à infraestrutura de transporte acordada no mercado (e que culmina na definição dos submercados e dos limites de intercâmbio). A escolha do citado paradigma foi sustentada por diversas justificativas, por exemplo, a preservação da estrutura de operação já estabelecida, um melhor tratamento das questões hidrológicas e da segurança energética e a proteção contra poder de mercado e práticas anticompetitivas, em especial nas cascatas. É esperado que o resultado do uso do paradigma esteja condizente com as justificativas e ainda à questões dos mercados físico e financeiro, tais como adequada valoração da *commodity*, representação de uma forma de equilíbrio de mercado, governança e simetria de acesso às premissas e modelos, a aplicabilidade da ordem de mérito resultante, liquidez e possibilitação de gestão de riscos.

Ao longo dos pouco mais de 20 anos de existência do mercado de energia no Brasil, os resultados do paradigma atual têm sido questionados, sendo que a ocasião mais recente ocorreu durante a CP 33/2017 ([3]). Embora a CP não tenha proposto a transição para a formação de preços por oferta, propôs a sua possibilidade, ainda que condicionada a estudos. Estes devem contemplar uma grande gama de assuntos, como mecanismos, procedimentos, credibilidade, garantias financeiras, segurança energética e modelos matemáticos.

Este artigo visa contribuir para a análise do equilíbrio da competição e do poder de mercado e para ferramenteas que possibilitem realizar projeções de preços na formação de preços por oferta. Na Seção 2, são discutidos o processo de formação de preços e de definição das ofertas a serem realizadas pelos agentes. Modelos matemáticos simples são apresentados na Seção 3, sendo aplicados na Seção 4 para a análise da influência da quantidade de agentes e da contratação bilateral-financeira no poder de mercado. Tais modelos estão, no entanto, limitados a condições simplificadas e hipotéticas. Considerando que a pesquisa acerca da transição para um modelo de formação de preços por oferta exige análise de situações reais e sofisticadas, na Seção 5 é apresentada a modelagem matemática via problema de otimização em dois níveis. Na Seção 6 são discutidas sugestões para trabalhos futuros, enquanto a conclusão geral é tema da Seção 7.

2.0 - DETERMINAÇÃO DAS OFERTAS AO MERCADO PELOS PRODUTORES

Em um mercado físico de energia onde a formação dos preços se dá por declaração pelos agentes (oferta de preços), alguns mecanismos de negociação podem ser utilizados, como a negociação contínua e diversos tipos de leilões. Entretanto, a forma que se tornou mais popular no mundo é o leilão de envelope fechado (declaração única). Nesse caso, os agentes ofertam blocos de energia e preços de compra (ou venda) e um algoritmo ou

devem ser nominados ao (registrados no) operador para orientar a operação. Como em adição à contratação bilateral costuma haver uma plataforma para realização de leilão que cumpre o papel de uma última oportunidade (*day-ahead*) para contratação física antes da operação, esse paradigma também é conhecido por *net pool*. Nesse mercado a formação de preços encontra-se dispersa (não explícita) no mercado, podendo, no entanto, haver bolsas que provejam alguma forma de *price clearing* (uma formação de preços, embora para somente uma parte do mercado). Esse paradigma é presente na Europa, sendo considerado o mais popular nos mercados de energéticos, sendo o predominante nos mercados de gás natural.

2 Também conhecido por *loose pool*, é um dos tipos de *gross pool*, onde um leilão é a única oportunidade para contratação de produtos físicos. Nesse caso, a própria plataforma onde a negociação ocorre é responsável por nominar as decisões do mercado para o operador a fim de orientar a operação. Esse paradigma está presente em alguns mercados nos Estados Unidos, Austrália e Nova Zelândia.

3 Também conhecido como *tight pool*, é o segundo tipo de *gross pool*. Esse paradigma é o implantado no Brasil.

modelo de otimização determina o equilíbrio do mercado (encontro das curvas de oferta e demanda), sendo o resultado composto por preço e ordem de mérito.

Parte do desafio nesse mecanismo está na definição da declaração a ser realizada pelos agentes. A racionalidade econômica leva os participantes a determinarem suas declarações buscando a maximização de seus lucros. Por lucro, entende-se o faturamento no mercado menos custo de produção (ou de oportunidade). Observe-se que o preço do mercado é uma informação ainda desconhecida no momento da definição da declaração. Para alguns agentes, conhecidos por tomadores de preço, a informação de preço é irrelevante na determinação de sua declaração ótima, que tende ao seu custo de produção ou de oportunidade. No entanto, os agentes com poder de influenciar o preço do mercado devem considerar o reflexo da sua declaração no equilíbrio do mercado e, conseqüentemente, no preço.

3.0 - MODELOS MATEMÁTICOS

O objeto deste artigo é prover ferramentas para a análise do equilíbrio da competição. Esta seção estabelecerá modelos específicos para a análise dos efeitos da quantidade de agentes produtores e da contratação bilateral no poder de mercado, discutidos nas próximas subseções. Para tanto, este artigo considerou algumas simplificações:

- o problema foi modelado com o enfoque na determinação da declaração pelos produtores e seu efeito no preço, considerando a curva de demanda conhecida *ex-ante* e os consumidores como tomadores de preço;
- o custo de produção é representado por uma curva estática e incorpora também custos de oportunidade, incluindo oportunidades futuras para hidrelétricas (como a função de custo futuro) e instalações de armazenamento de energia, além da aversão a risco;
- foi considerada simetria total de informação;
- não foram consideradas incertezas de nenhuma forma, tornando o problema matemático determinístico; e
- restrições técnicas específicas de fonte, como tempo de viagem da água e custos de partida, foram desprezadas.

3.1 Duopólio: o modelo de Cournot

Um clássico modelo de oligopólio é a base dos estudos desta seção: o Modelo de Cournot ([4]), no qual as decisões dos agentes referem-se às suas quantidades a produzir (q_1 e q_2). Tal decisão é baseada na quantidade esperada de produção do adversário e na curva de demanda do mercado ($D(P)$). O preço depende da produção total das empresas, sendo obtido a partir da curva inversa de demanda ($P(D)$), sendo a quantidade demandada D igual à quantidade total ofertada. Assume-se também que ambos os agentes produtores conhecem a curva de demanda e a curva de custo do adversário.

O objetivo de cada firma é encontrar o nível de produção que maximize seu lucro:

$$\max \Pi_1(q_1) = P(Q)q_1 - C_1(q_1) \quad (0)$$

Onde Π_1 é o lucro do agente produtor 1, q_1 é sua oferta de energia, P é o preço de equilíbrio do mercado e C_1 é a equação que rege seu custo de produção.

No processo de tomada de decisão por Cournot, a empresa busca encontrar a quantidade que maximiza seu lucro $\Pi_1(q_1)$, o que, matematicamente, corresponde a resolver a equação formada pela derivada do lucro igualada a zero:

$$\frac{d\Pi_1(q_1)}{dq_1} = \frac{dP(Q)}{dq_1}q_1 + P(Q) - \frac{dC_1(q_1)}{dq_1} = 0 \quad (0)$$

A expectativa do agente produtor 1 da quantidade de energia demandada (Q_1^e) é definida pela soma de sua quantidade ofertada e da expectativa de quantidade ofertada pelo adversário, conforme (3). O índice e foi utilizado para denotar expectativa.

$$Q_1^e = q_1 + q_2^e \quad (0)$$

Onde a quantidade q_1 é a variável cujo valor se deseja encontrar no processo de maximização e q_2^e é a oferta do agente 2 conforme expectativa do agente 1.

O custo de produção do agente produtor 1, $C_1(q_1)$, e a curva inversa da demanda (disponibilidade a pagar, P_1^e , em função da quantidade consumida, Q_1^e), foram considerados conforme as notações apresentadas em (0) e (0), respectivamente. Para a curva inversa da demanda foi considerada a expectativa para o agente 1, tendo em vista a sua expectativa para as quantidades declaradas pelo outro agente produtor e conhecimento pleno da curva de demanda (constantes A e B).

$$C_1(q_1) = \alpha_1 + \beta_1 q_1 + \gamma_1 q_1^2 \quad (0)$$

$$P_1^e(Q_1^e) = A - BQ_1^e = A - B(q_1 + q_2^e) \quad (0)$$

Substituindo-se as equações (0) e (0) em (0), encontra-se a equação que define a quantidade a ser declarada pelo agente 1 para maximizar seu lucro.

$$q_1(q_2^e) = \frac{A - \beta_1 - Bq_2^e}{2B + 2\gamma_1} \quad (0)$$

3.2 Mercado com N agentes

Como uma continuação da análise, propõe-se o estudo de um mercado com N agentes. Semelhante ao estudo do duopólio de Cournot, o objetivo de cada produtor é determinar a quantidade de energia a ser declarada de modo que seu lucro seja maximizado. Para tanto, são consideradas as equações das expectativas do agente produtor i da quantidade total produzida e da inversa da demanda, conforme (7) e (8), respectivamente:

$$Q_i^e = q_i + \sum_{n \neq i}^N q_n^e \quad (0)$$

$$P_i^e(Q_i^e) = A - BQ_i^e = A - B\left(q_i + \sum_{n \neq i}^N q_n^e\right) \quad (0)$$

Associando-se as equações (0), (0) e (0), encontra-se a quantidade a ser declarada que maximiza o lucro do agente em função da demanda, de sua curva de custos, da quantidade de agentes no mercado e da quantidade ofertada pelos demais agentes.

$$q_i(q_n^e) = \frac{A - \beta_i - B \left(\sum_{n \neq i}^N q_n^e \right)}{2B + 2\gamma_i} \quad (0)$$

3.3 Mercado com N agentes iguais

A consideração de inúmeros agentes distintos resulta em um processo iterativo para a solução do equilíbrio do mercado. De modo a evitar tal processo, assume-se que os N agentes são iguais, ou seja, possuem os mesmos custos de produção e considera-se que, no equilíbrio da competição, as quantidades de todos serão iguais ($q_i = q_n$). Com a simplificação, obtém-se a equação (0) para a quantidade declarada pelos agentes produtores em substituição a (0):

$$q_i = \frac{A - \beta}{B(N+1) + 2\gamma} \quad (0)$$

3.4 Agentes com contratos bilaterais

Um contrato define a entrega de determinada quantidade de um ativo a um preço previamente acordado. Supõe-se um contrato de venda pelo agente produtor i de x_i^c , em MWh, a um preço P_i^c , em \$/MWh. A receita do agente é definida como ([5]):

$$R_i^c(q_i, x_i^c, P_i^c) = P(Q)(q_i - x_i^c) + x_i^c P_i^c \quad (0)$$

$$= P(Q)q_i + (P_i^c - P(Q))x_i^c$$

Observe-se que o contrato bilateral considerado é financeiro e registrável na CCEE para fins de redução das exposições no mercado físico (MCP), de modo que a equação do retorno representa uma liquidação de diferenças⁴. Salienta-se que a liquidação das diferenças (i) não torna físico o produto do contrato bilateral, ou seja, não altera o paradigma de mercado de *pool* para bilateral, e (ii) é a forma convencional de funcionamento de mercados *pool*, incluindo no Brasil.

Para a análise matemática, primeiramente, modela-se o lucro do produtor i , que possui compromissos contratuais:

$$\Pi_i^c(q_i, x_i^c, P_i^c) = P(Q)(q_i - x_i^c) + x_i^c P_i^c - C(q_i) \quad (0)$$

Deriva-se a equação (0) em relação a q_i e iguala-se a zero com o objetivo de determinar a quantidade declarada que maximiza o lucro para o agente produtor:

⁴ A liquidação das diferenças no modelo *pool* pode ser interpretada como o agente entregando a totalidade da energia produzida no MCP ao preço spot, recomprando a parcela comprometida em contratos bilaterais do MCP ao mesmo preço spot e entregando às contrapartes ao preço contratado [6].

$$\frac{d\Pi_i^c(q_i, x_i^c, P_i^c)}{dq_i} = \frac{dP(Q)}{dq_i} q_i + P(Q) - \frac{dP(Q)}{dq_i} x_i^c - \frac{dC(q_i)}{dq_i} = 0 \quad (0)$$

Considerando (0) e (0), determina-se a quantidade q_1 que maximiza o lucro:

$$q_i(q_{n \neq i}^e, x_i) = \frac{A - \beta + B * x_i^c - B \left(\sum_{n \neq i}^N q_n^e \right)}{2B + 2\gamma} \quad (0)$$

De maneira semelhante às seções anteriores, assume-se que todos os agentes são idênticos e realizam a mesma análise que o agente i , de modo que as gerações dos competidores se igualam à quantidade q_i :

$$\sum_{n \neq i}^N q_n^e = (N-1) q_i \quad (0)$$

Assim sendo, determina-se a expressão que relaciona a quantidade que maximiza o lucro, q_i , com o número de agentes, N , e o volume de contratação do agente i , x_i^c :

$$q_i(N, x_i^c) = \frac{A - \beta + B x_i^c}{B(N+1) + 2\gamma} \quad (0)$$

Nota-se que a diferença para o caso sem contratos está no termo adicional $B x_i^c$ no numerador. Assim, para um mesmo N , quanto maior o comprometimento do agente produtor com contratos (x_i^c), maior tenderá a ser sua declaração de energia.

4.0 - ANÁLISES NUMÉRICAS SOBRE O PODER DE MERCADO

Tendo modelado a competição em função da quantidade de agentes produtores idênticos e do volume de contratação ao qual estão submetidos, apresentam-se nesta sessão resultados de simulações numéricas.

4.1 Premissas

Na Tabela 1 estão relacionadas as premissas para o custo de produção e a curva da demanda, comuns às duas análises. Todos os agentes de produção são iguais e a curva de demanda representa todos os agentes de consumo.

Tabela 1 – Coeficientes utilizados nas análises numéricas.

Equação	Coeficiente	Valor
Custo de produção	α	50 \$
	β	5 \$/MWh
	γ	0,001 \$/MWh ²
Curva da demanda	A	10 \$/MWh

	<i>B</i>	0,002 \$/MWh ²
--	----------	---------------------------

4.2 Efeito da quantidade de agentes

A Figura 1, a seguir, ilustra o exercício do poder de mercado em função da quantidade de agentes (iguais) no mercado (aplicação das equações (8) e (0)). Para tanto, foi considerado como caso-base para a comparação do estudo um mercado perfeitamente competitivo onde, segundo ([4]), o preço declarado pelos agentes corresponde exatamente ao seu custo de produção por unidade, ou sua “intenção de vender”, que inclui também seus custos de oportunidade.

Observa-se claramente a aproximação do preço de equilíbrio do mercado ao custo marginal (eixo vertical) à medida que a quantidade de agentes aumenta (eixo horizontal). Em outras palavras, a proximidade com a competição perfeita torna-se mais forte com o aumento da quantidade de agentes, embora ainda com 50 agentes a diferença entre o preço de equilíbrio do mercado esteja 1,9% acima do custo de produção. Em efeito, “competição perfeita” é conceito hipotético, embora útil para análise, sendo que nos mercados reais deve-se aceitar conviver com algum nível de poder de mercado, ainda que residual.

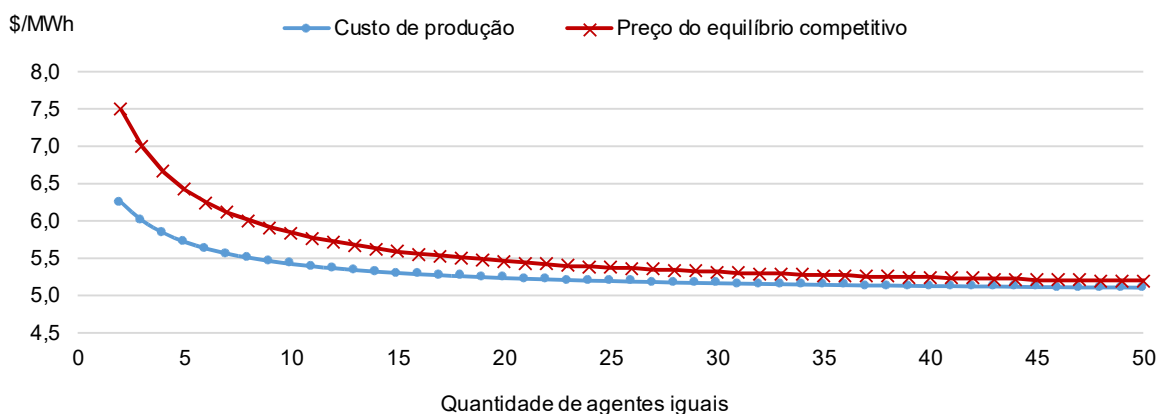


Figura 1 – Efeito da quantidade de agentes iguais no preço de equilíbrio.

4.3 Efeito da contratação bilateral

Esta sessão dedica-se a avaliar o efeito da contratação bilateral no poder de mercado, por meio do uso das equações (8) e (0) e da consideração de apenas dois agentes produtores.

O aumento de volumes contratados bilateralmente para a mesma quantidade de agentes do mercado implica no aumento na oferta de energia no mercado de curto prazo, Figura 2, o que implica redução no preço do equilíbrio competitivo, conforme observa-se na Figura 3. que o aumento de volumes contratados bilateralmente aproximam o preço do mercado do custo de produção.

Energia ofertada (MWh)

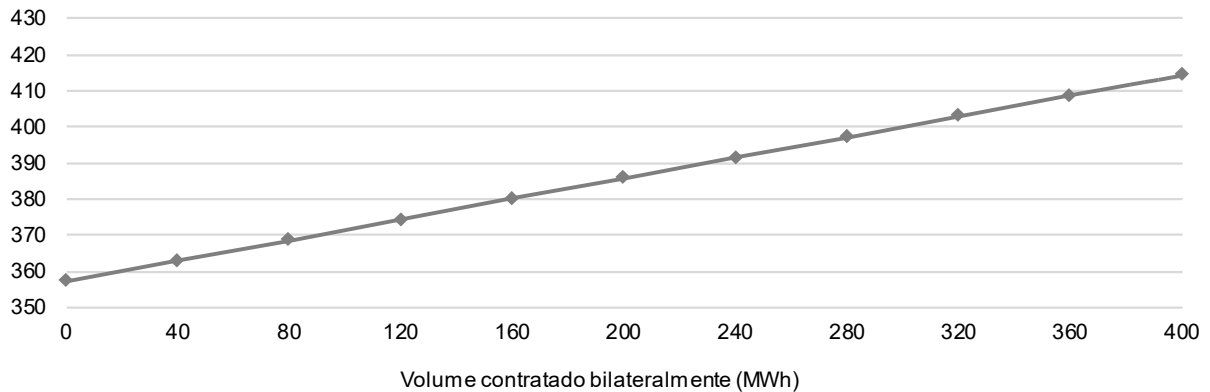


Figura 2 – Efeito da contratação bilateral na oferta do agente no mercado de curto prazo - cinco agentes produtores iguais.

Preço do equilíbrio competitivo \$/MWh

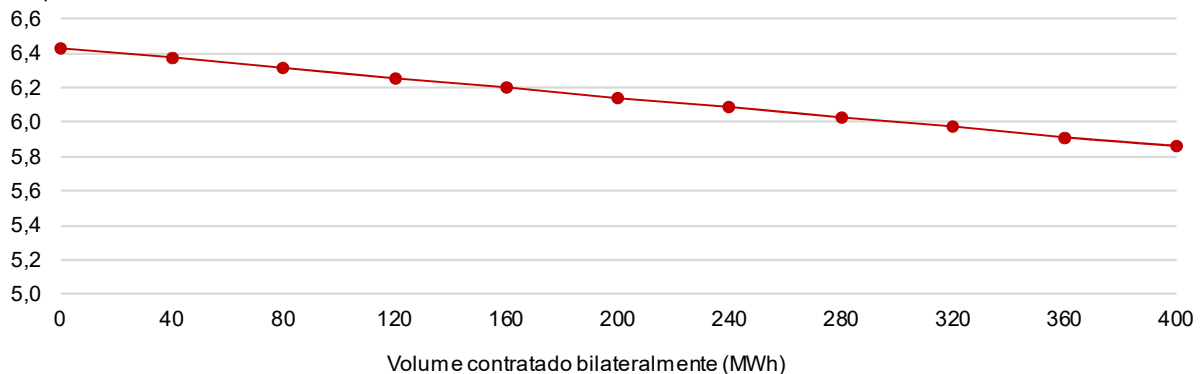


Figura 3 – Efeito da contratação bilateral no preço do equilíbrio em um mercado - cinco agentes produtores iguais.

5.0 - SOFISTICAÇÕES NA MODELAGEM MATEMÁTICA

A aplicação da modelagem apresentada nas seções anteriores, embora seja útil para ilustrar e estudar como os mecanismos de mercado atuam, está limitada a problemas e hipóteses simplificadas. De modo a possibilitar a análise de problemas complexos e, eventualmente, mais aderentes à realidade, nesta seção sugere-se o uso de modelo de otimização matemática de dois níveis, onde um problema de otimização (primeiro nível) tem como uma de suas restrições um outro problema de otimização (segundo nível). Para a aplicação do modelo aos problemas tratados neste artigo, o primeiro nível corresponde à maximização da receita do agente enquanto o segundo consiste na emulação do problema de formação de preços do mercado conforme esperado pelo mesmo.

5.1 Problema do nível 2 – formação de preços

A formação de preços é o problema resolvido pelo mercado, ou seja, a sua solução corresponde ao equilíbrio do mercado, composto por preço de equilíbrio e quantidade despachada para atender a demanda. Propõe-se modelar o problema do segundo nível (17) como a maximização do excedente total do mercado, ou seja, a soma

dos excedentes do consumidor (área abaixo da curva de demanda até o preço) e do produtor (área acima da curva de oferta até o preço), cuja interpretação gráfica é apresentada no gráfico (a) da **Figura 4**:

$$\max \text{excedente total} = \text{excedente consumidor} + \text{excedente produtor} \quad (0)$$

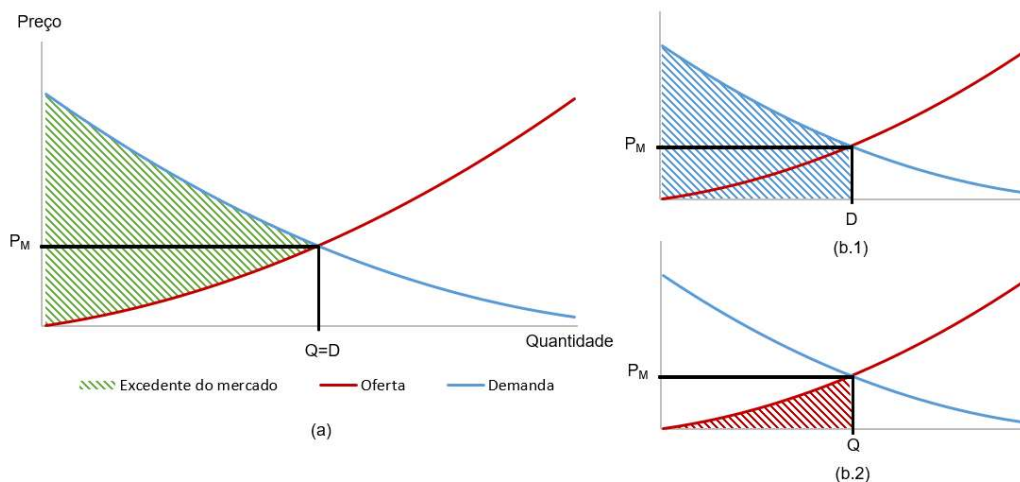


Figura 4 – (a) Excedente do mercado e (b) áreas consideradas no cálculo do excedente do mercado.

De forma alternativa, embora equivalente, o problema do equilíbrio do mercado pode ser descrito como a maximização da área abaixo da curva da demanda (gráfico (b.1) da **Figura 4**) subtraída a área abaixo da curva da oferta até a quantidade de equilíbrio ((b.2) da **Figura 4**), conforme a equação (18). As áreas estão representadas por somatórios, não pelas integrais, uma vez que em mercados reais as curvas não são contínuas, mas sim discretizadas em blocos de preço versus quantidade declarados pelos agentes. Note-se que o preço de equilíbrio do mercado (P_m) é a variável dual (multiplicador de Lagrange) associada à restrição de balanço de carga ($\sum_i q_i - \sum_j d_j = 0$), enquanto as definições individuais de produção e consumo, representadas respectivamente por q_i e d_j , correspondem às variáveis primais do problema, que inclui a ordem de mérito dos produtores. Os índices i e j são os contadores de produtores e consumidores, respectivamente.

$$\max_{d_j, q_i} \sum_i^{Blocos\ de\ consumo} p_i * d_i - \sum_j^{Blocos\ de\ produção} p_j * q_j$$

S. d.:

$$\sum_i^{Blocos\ de\ produção} q_i - \sum_j^{Blocos\ de\ consumo} d_j = 0 : P_m$$

Um caso particular do problema, comumente conhecido como “problema do operador do sistema”, é obtido quando a demanda é considerada inelástica, onde o excedente do consumidor é infinito. Com isso, o problema

da formação de preços pode ser simplificado à minimização do custo (ou o valor ofertado, a depender do paradigma de mercado) de produção pelos geradores, sujeito à igualdade entre as quantidades consumida e produzida (conhecido como balanço de carga), formato convencionalmente em uso no MCP pela CCEE.

5.2 Problema do nível 1 – maximização do lucro

O problema de otimização do primeiro nível de cada agente (produtor, no caso) é a maximização do lucro. A equação (19) representa tal problema e inclui a situação de contratação bilateral:

$$\max_{q_1, P_1, P_m} \Pi_1(q_1, P_m, x_1, P_c) = P_m * (q_1 - x_1) + x_1 * P_c - C(q_1) \quad (0)$$

5.3 Problema completo de dois níveis

De forma simplificada, o problema resultante de dois níveis é apresentado em (20).

$$\max_{q_1, P_1, d_j, P_m} P_m * (q_1 - x_1) + x_1 * P_c - C(q_1)$$

s. a. .:

$$\max_{d_j, q_i} \sum_j^{Blocos\ de\ consumo} p_j * d_j - \sum_i^{Blocos\ de\ produção} p_i * q_i \quad (0)$$

s. a. .:

$$\sum_i^{Blocos\ de\ produção} q_i - \sum_j^{Blocos\ de\ consumo} d_j = 0 : P_m$$

O problema matemático (20)⁵ pode ser reduzido a um problema de otimização de um único nível pela substituição do problema de segundo nível por suas condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) ([7]). Esse problema resultante é conhecido como MPEC (*Mathematical Program with Equilibrium Constraints*, ou Programação Matemática com Restrições de Equilíbrio). Cada agente formador de preço deterá um problema do tipo (20), sendo que, caso haja dois ou mais agentes, a interação entre eles pode ser representada por um modelo de programação matemática denominado EPEC (*Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints* ou Problema de Equilíbrio com Restrições de Equilíbrio). Discussões sobre tais problemas de otimização de dois níveis, MPECs e EPECs podem ser observadas em [9], [10], [11], [12] e [13].

6.0 - CONCLUSÕES

A discussão sobre alteração do mercado para formação de preços por oferta exigirá atenção ao exercício de poder de mercado. Para possibilitar avaliações numéricas robustas e confiáveis, modelagem matemática deve ser aplicada. Neste artigo foi ilustrada a aplicação do modelo de Cournot, o qual permitiu constatar os efeitos da quantidade de agentes e da presença de contratos bilaterais na redução do potencial de poder de mercado. Embora tais constatações sejam representativas para a conclusão geral, os modelos matemáticos foram deduzidos a partir de uma simplificação do problema. A consideração das inúmeras complexidades faz-se necessária para avaliações mais concretas: particularidades das curvas de produção dos agentes, resposta da

⁵ Existem pacotes computacionais para resolver problemas do tipo de (20), a exemplo do GAMS ([8]).

demanda, restrições da tecnologia de produção (que exige um *unit commitment*), disposição de usinas hidrelétricas pertencentes a diferentes proprietários em uma mesma cascata [12], [13] e [14], MRE, segurança energética, incertezas, em especial para as tecnologias renováveis, aversão a risco, necessidade de cômputo de custos de oportunidade para as tecnologias de armazenamento de energia ou combustível (a exemplo do valor futuro da água), custos de oportunidade em outros mercados (observando que um mercado livre de gás natural poderá ser desenvolvido nos próximos anos) etc. Para endereçar tais questões, propõe-se o uso de modelos matemáticos de otimização de dois níveis, cuja solução é ainda desafiadora. Embora tenha grande potencial para avaliações de poder de mercado e projeções de preços em um contexto de formação de preços por oferta, a aplicação de otimização de dois níveis no Brasil ainda é escassa. As oportunidades de pesquisa em torno do tema podem ser segregadas em três vertentes: a modelagem do problema propriamente dito (modelo do mercado, cascatas, resposta da demanda, funções de produção específicas etc.), as aplicações (pelo regulador, pelos agentes do mercado etc.) e as estratégias de solução (relaxação Lagrangeana, utilização de variáveis do tipo SOS1, expansão binária etc.).

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BARROSO, L.A.N. et al. **Classification of Electricity Market Models Worldwide**. *International Symposium CIGRE/IEEE PES, New Orleans, 2005*.

[2] SILVA, E. L. da. **Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica**. Florianópolis: Edição do autor, 2012.

[3] MME – Ministério de Minas e Energia. **Proposta de aprimoramento do marco legal do setor elétrico**. Nota Técnica Nº 5/2017/AEREG/SE, Consulta Pública N. 33, 2017.

[4] PINDYCK, R.S.; RUBINFELD, D.L. **Microeconomia**. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2009.

[5] KELMAN, R.; BARROSO, L.A.N.; PEREIRA, M.V.F. **Market Power Assessment and Mitigation in Hydrothermal Systems**. *IEEE Transactions on Power Systems*, V.16, 2001.

[6] SCOTT, T.J.; READ, E.G. **Modelling hydro reservoir operation in a deregulated electricity market**. *International Transactions in Operational Research*, V. 3, 1996.

[7] BAZAARA, M.S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. **Nonlinear Programming, Theory and Applications**. John Wiley & Sons, New York, 1993.

[8] ROSENTHAL, R.E. **A GAMS Tutorial**, Naval Postgraduate School, Monterey.

[9] LUO, Z-Q.; PANG, J-S.; RALPH, D. **Mathematical Programs with Equilibrium Constraints**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[10] BARROSO, L.A.N. **Estratégias de Ofertas Ótimas Sob Incerteza e Cálculos de Equilíbrios de Nash de Agentes Geradores em Mercados de Curto Prazo de Energia Elétrica: Uma Abordagem por Programação Linear Inteira**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

[11] GABRIEL, S.A. et al. **Complementarity Modeling in Energy Markets**, Springer, New York, 2013.

[12] CRUZ, M.P. **Estratégias de Ofertas em Mercados Competitivos de Energia Elétrica com Predominância de Geração Hidrelétrica**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2017.

[13] CRUZ, M.P. et al. **Strategic Bidding for Price-Maker Producers in Predominantly Hydroelectric Systems**. *Electric Power Systems Research*, V. 140, 2016.

[14] ZUCARATO, A.N.; DECKER, I.C.; FERNANDES, R.C., SILVA, E.L.; SILVEIRA, F.S.V. **Identificação da Viabilidade Prática de Modelos Loose-Pool em Sistemas Hidrotérmicos**. II CITENEL, Congresso de Inovação Tecnológica em energia Elétrica, Salvador, 2003.



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3943
GCR/29

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando Pappas é bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB – 2018), tendo apresentado trabalho de conclusão de curso estudando a resposta pelo lado da demanda em um contexto de preços horários de energia elétrica. Atualmente trabalha como especialista em energia na ABIAPE.



Marcelo Luís Loureiro dos Santos é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Mestre e Doutor pelo LabPlan/UFSC em formação de preços e planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. Possui também MBA em Gestão de Projetos pela FGV e CORE pela Harvard Business School Online. Atualmente é diretor de energia na ABIAPE.