

1 Introdução

1.1. Motivação

O mundo moderno depende cada vez mais de energia para satisfazer níveis crescentes de qualidade de vida, bem estar social e progresso material. No entanto, esta realidade pressupõe que a energia elétrica esteja disponível a um preço relativamente baixo, o que nem sempre corresponde à realidade. Se por um lado se busca qualidade e não interrupção no fornecimento de energia elétrica, por outro é necessário garantir os investimentos para a expansão do sistema. Amplas reformas no setor de eletricidade vêm sendo executadas desde o final do século passado em todo o mundo para alcançar estes objetivos, caracterizando-se como uma mudança de paradigma para o setor (Voropai & Handschin, 2001).

Antes da década de 1980, a energia elétrica era vista como um monopólio natural de propriedade pública na Europa e de propriedade privada nos Estados Unidos, na maioria dos casos. A previsão do preço de energia no modelo monopolista antigo, onde a geração não estava sujeita à competição, era uma tarefa relativamente direta, embora cheia de detalhes e bastante árdua (Angelus, 2001:32), pois a própria estrutura de “mercado” era estável e regulada; informações das empresas eram compartilhadas; e a coordenação e o planejamento do setor eram centralizados. Obtinha-se, assim, uma boa precisão na previsão da oferta e da demanda e, por conseguinte, do preço da energia elétrica.

Este quadro começou a mudar quando Chile, Inglaterra e Noruega propuseram seus modelos competitivos para a geração de eletricidade. Entre os princípios que nortearam os mais importantes processos de reformas do setor elétrico em todo o mundo estão a separação das atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia (descentralização do setor) visando ganhos de eficiência econômica através de competição nas atividades *per si*; despacho descentralizado com base em ofertas de preços dos geradores; garantia de livre acesso às redes de transmissão e privatização, entre outros.

Neste contexto, o preço da energia passou a exercer um papel fundamental, entre outras coisas porque ele precisa traduzir ao investidor os sinais econômicos necessários para a expansão do sistema, ao mesmo tempo em que deve refletir os custos reais.

Um dos grandes benefícios esperados com a liberalização e desregulamentação do setor elétrico é a queda dos preços, uma vez que os consumidores ou mesmos os comercializadores de energia podem escolher livremente seus fornecedores (Bastian, 1999). Bower et al (2001), por exemplo, relatam que em abril de 1998, quando o mercado alemão foi liberalizado, todos os consumidores tiveram a permissão, em princípio, de escolher seu supridor. A consequência imediata foi uma queda abrupta dos preços do mercado atacadista, aproximando-se dos custos marginais de produção no ano de 1999.

Embora o preço médio da energia elétrica em vários países tenha caído significativamente na fase inicial das reformas, tem-se observado desde então um aumento da volatilidade na série de preços no mercado à vista ou spot¹ em diversos países como, por exemplo, EUA (Califórnia especialmente), Austrália e Brasil. Segundo Krause (1995), “o mercado spot se caracteriza por uma instabilidade que lhe é intrínseca, isto é, constata-se uma elevada volatilidade dos preços.” Davidson et al (2002) relacionam dois motivos para a alta volatilidade dos preços ou a ocorrência dos chamados *price spikes*: o fato da energia elétrica ter suas especificidades, pois a mesma não pode ser armazenada em grandes quantidades, e a demanda deve estar em equilíbrio constante com a produção.

Conseqüentemente, as reformas trouxeram também uma elevação dos riscos associados à contratação de energia. O ‘quanto’ e ‘quando’ comprar no mercado spot são decisões que passam a ser cruciais para a saúde financeira das companhias. Como tais decisões dependem especialmente do preço da energia elétrica, um julgamento mal feito ou uma estratégia de investimentos mal traçada hoje poderá, no futuro, acarretar um prejuízo de milhares a milhões de dólares a uma empresa – dependendo de seu porte – e, até mesmo, levá-la à falência.

O preço *ex-ante* da energia (R\$/MWh) no sistema elétrico brasileiro, predominantemente hidroelétrico, é calculado atualmente pelos agentes no

¹ Algumas palavras muito citadas e consideradas jargões da área não serão grifadas na tese; entre elas estão, por exemplo, “spot” e “Pool”.

mercado atacadista de energia (MAE) considerando a previsão de carga e vazões e restrições de geração, evitando déficit e vertimento. O agente comercializador, para atender suas atribuições, precisa criar sua própria base de apoio à decisão para a política de contratos nesse mercado competitivo, o que requer uma adaptação de suas práticas negociais e criação de modelos de previsão dos preços de compra e venda de energia no mercado spot, com o auxílio de instrumentos eficazes.

O mercado brasileiro de energia, mesmo em estágio embrionário, vem realizando transações de volume considerável no mercado spot, negociando, por exemplo, o montante de energia disponível pela diferença entre a carga real e a definida nos contratos iniciais estabelecidos em 1998. Apesar de todos os problemas enfrentados pelo MAE no Brasil, pois não tem conseguido realizar normalmente a liquidação dos contratos devido a entraves jurídicos entre as empresas comercializadoras e as geradoras (o que na prática paralisa suas ações²), tem-se notado um rápido crescimento no número de negócios realizados desde sua criação, em setembro de 2000.

Por exemplo, em junho de 2002, mais de 70 contratos bilaterais foram assinados em seu âmbito (45% a mais que junho de 2001), com um volume de 2,3 milhões de MWh (contra 1,1 milhão de MWh em junho de 2001). Entre setembro de 2000 e março de 2001 foram comercializados, aproximadamente, R\$ 1,06 bilhão (US\$ 294 milhões) no MAE por 95 agentes credenciados. O montante entre setembro de 2000 e junho de 2002 é de aproximadamente R\$ 15 bilhões (US\$ 4.2 bilhões) (Platts, 2002).

Ainda que os 25% do volume de energia dos contratos iniciais não sejam anualmente disponibilizados para negociação direta entre empresas (bilateral) ou mercado spot, tal como estava previsto que acontecesse até o início de 2003 segundo a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, negociações continuarão a ser feitas com as diferenças, o que expressa a importância do estudo e o desenvolvimento de modelos de previsão do preço spot específicos que possam atender às necessidades deste mercado no país.

² Apenas no final de 2002 é que 50% dos contratos dos últimos dois anos foram efetivamente liquidados. Está previsto que os outros 50% serão liquidados bilateralmente.

Portanto, desenvolver modelos de previsão para os preços no curto prazo (spot) – além de identificar, medir e tratar os possíveis riscos associados – são os novos e grandes desafios que a jovem indústria de energia elétrica está sendo compelida a enfrentar, munindo assim de ferramentas o tomador de decisões em sua estratégia de comercialização de energia ou avaliação de ativos reais em projetos de investimento em geração e transmissão.

O tema ‘previsão do preço spot da energia elétrica’ está em voga³, mas é interessante notar que a pesquisa em torno dela é relativamente pequena, frente a sua importância. Isto em parte pode ser explicado pelo relativo ineditismo do tema. Dada a complexidade do setor elétrico, dez ou doze anos não parecem suficientes para se obter uma estrutura plena de mercado e, conseqüentemente, modelos de previsão para este mercado. Além disso, a previsão do preço spot é um assunto estratégico para o agente comercializador de energia que não quer compartilhar informações neste novo ambiente competitivo.

Existem poucos modelos de previsão do preço spot propostos na literatura, especialmente para o Brasil, onde os preços são calculados via modelos computacionais do planejamento da operação, ao contrário de países como Inglaterra e Austrália, que adotam sistemas baseados em uma espécie de leilões de energia.

Da literatura internacional, verifica-se que a modelagem do preço spot de energia elétrica está ligada à modelagem de sua volatilidade e também se baseia em processos de reversão para a média⁴ com *jumps*, (Deng, S., 2000 e 1998; Ethier, 1999; Ethier & Mount, 1998; Knittel & Roberts, 2001)⁵. Este modelo não parece ser adequado ao Brasil, onde a volatilidade do preço spot está relacionada principalmente à volatilidade das vazões afluentes.

Davison et al (2002), em uma abordagem interessante para se prever o preço spot, apresenta um modelo estocástico especialmente desenvolvido para os picos (*spikes*) na série histórica de preços spot. Ele é um modelo chaveado (*switching*

³ Bunn (2002) fornece uma revisão das principais questões metodológicas e técnicas empregadas no problema de previsão de carga horária e preços nos mercados competitivos de eletricidade. Ainda, o autor sustenta que a previsão de carga e a previsão dos preços no mercado atacadista de energia são atividades interligadas e discute a previsão pelo lado da demanda (*demand-side*) e pelo lado da oferta (*supply-side*).

⁴ Os preços oscilariam inicialmente e tenderiam a reverter para um nível de equilíbrio.

⁵ Knittel & Roberts (2001), por exemplo, investigam o comportamento dos preços na Califórnia, aplicando, além de modelos de reversão para a média, outros como o ARMAX e o EGARCH.

model) baseado em misturas de distribuições. O autor conclui que este modelo é uma ferramenta poderosa para a precificação de contratos de opções no setor elétrico, porém ressaltando que o modelo é bom apenas para os *spikes*, sendo necessário o desenvolvimento de modelos para preços baixos. Além disso, existe uma preocupação do autor é quanto à descontinuidade do modelo.

Leon & Rubia (2001) descrevem e caracterizam a evolução temporal da série de preços médios diários negociados no mercado diário de eletricidade da Espanha, no período de 1º janeiro de 1998 a 31 de outubro de 2000. Analisou-se, especialmente, a existência de raízes unitárias no nível da série de preços, utilizando testes de raízes unitárias. Os autores também modelam a volatilidade condicional da série através de modelos EGARCH.

Stevenson (2001) aplica as transformadas de *wavelets* (ondaletas) para examinar tanto a série de preço quanto a de demanda da Austrália em diferentes localizações e níveis de resoluções, buscando diferenciar o que é sinal e o que é ruído. Em seguida, são aplicados às séries diversos modelos da classe TAR – *threshold autoregressive*. O autor conclui que os modelos obtêm bons resultados com os dados filtrados, conseguindo capturar suas componentes de média e a variância.

Deve-se destacar, também, o uso de modelos “inteligentes”, baseados em lógica fuzzy e redes neurais, para a previsão do preço, e.g. Hong & Hsiao (2002 e 2001); Ramos et al (2002); Xiaohong et al (2000); Wang & Ramsay (1998) e Dondo & El-Hawary (1996), entre outros.

Uma revisão da literatura sobre modelos de previsão do preço spot no Brasil mostra que um dos primeiros modelos empíricos foi proposto por Silva (2001), baseado em probabilidades de transição de estados dos preços⁶. Segundo o autor, o preço spot de energia elétrica no Brasil teria três estados: (i) estado 1 – preço baixo (zero a R\$ 20/MWh) seguindo uma distribuição Normal $N(8,7)$; (ii) estado 2 – preço alto (maior que R\$ 20/MWh) seguindo uma $N(72,58)$; e (iii) estado 3 – preço de seca (maior que R\$ 100/MWh) seguindo uma $N(250,150)$, sendo que os parâmetros das distribuições dos estados 1 e 2 são estimados com a série histórica do custo marginal de operação (CMO) e o estado 3 teria uma ocorrência aleatória,

⁶ Medeiros et al (2001b) utilizam o conceito de “Matrizes de Transição” para a obtenção da transição de um estado presente e um estado futuro do preço.

podendo chegar ao custo do déficit. O autor conclui que as probabilidades de o preço spot passar de um estado baixo para alto e dele estar no estado alto e continuar alto seguem um processo de reversão da média (Silva, 2001:65).

Em abordagens estatísticas e de séries temporais, Sousa (2003) e Amaral (2003) apresentam modelos de previsão do preço spot de energia elétrica no Brasil utilizando, respectivamente, modelos estruturais clássicos e modelos STAR (*smooth transition autoregressive*).

Com respeito a modelos com horizonte maior, Rocha et al (2001) mostram um sistema construído para simular contratos de energia usando dados de vazões sintéticas e custos marginais de operação (CMO) obtidos do “Newave” – programa desenvolvido pelo CEPEL e utilizado oficialmente pelo ONS e MAE, que define a cada estágio (mês) a operação ótima do sistema e fornece os valores esperados de CMO para todo o período de planejamento (Cepel, 1999b).

Para o longo prazo, Umbria (2002) apresenta um modelo predictor de preços da energia nova das usinas que compõem o plano de obras. Seu modelo baseia-se nos Planos Decenais de Geração e no fluxo de caixa de cada um dos aproveitamentos disponibilizados na base de dados da ANEEL.

1.2. Objetivo

Em função do número limitado de modelos propostos de previsão do preço spot e de sua importância para a comercialização de energia e estratégias de contratação por parte dos agentes, o principal objetivo desta tese é propor um modelo de previsão do preço de curto prazo (“spot”) da energia elétrica no Brasil. A proposta baseia-se em uma metodologia que utiliza sistemas neuro-fuzzy (SNF) e os programas do planejamento da operação.

Além disso, esta pesquisa tem por objetivos:

- i. Apresentar o estado da arte em modelagem para a política e o mercado de energia elétrica;
- ii. Analisar e discutir os principais riscos envolvidos na contratação de energia elétrica e medidas para mitigá-los.
- iii. Utilizar modelos de redes neurais visando comparar os resultados obtidos com os SNF.

O modelo proposto para a previsão do preço spot de energia elétrica no Brasil tem as seguintes características, entre outras:

1. Estima uma distribuição do preço spot no curto prazo (próximos meses ou semanas) considerando as principais variáveis que afetam o preço spot no Brasil;
2. Obtém distribuições mais informativas e com menor dispersão do que as obtidas apenas com o Newave;
3. Permite uma análise de sensibilidade e de cenários, ou até mesmo a simulação do impacto dos níveis de armazenamentos e afluências na previsão do preço spot;
4. Permite a inclusão de variáveis que não possuem um histórico ou dados para o treinamento, como o plano de obras, limites de intercâmbio, demanda, El-Niño etc., caso se faça necessário;
5. Permite conhecer a relação entre as principais variáveis e o preço spot, devido às características intrínsecas de um modelo neuro-fuzzy (regras fuzzy);
6. Permite análises rápidas, pois o modelo é executado em cerca de 1 minuto. Note que uma análise similar utilizando o Newave é inviável computacionalmente, pois o modelo leva em média de 5 a 8 horas, dependendo da máquina utilizada, para obter os resultados.

1.3. Hipóteses

A proposta é trabalhar com o custo marginal de curto prazo ou custo marginal de operação (CMO) na modelagem do preço spot, pois este é valor base para o preço spot no MAE. O objetivo não é o de reproduzir o cálculo do preço através da programação estocástica ou equivalente, mas utilizar indiretamente os resultados obtidos dos modelos do planejamento da operação, buscando uma estimativa aproximada para o processo gerador do preço.

Assim, objetiva-se construir modelos tanto simples quanto eficientes utilizando as principais variáveis que atualmente afetam o preço. Os modelos podem, no entanto, incluir eventualmente outras variáveis, em uma segunda etapa do trabalho, caso estas se façam necessárias.

A escolha das variáveis para o modelo de previsão proposto foi feita de forma *ad hoc* e baseada no critério da parcimônia.

1.4. Validade dos Resultados

Os modelos de previsão do preço aqui propostos são válidos para qualquer subsistema (submercado), embora os estudos de caso considerem apenas o subsistema SE/CO, por ser este o maior e mais importante do país, com participação de aproximadamente 70% no armazenamento máximo do sistema, 60% no consumo e 45% na capacidade instalada. Simulou-se, assim, um caso onde os limites de intercâmbio são nulos.

Finalmente, apesar dos modelos de previsão apresentados no estudo de caso do sexto capítulo utilizarem dados mensais, também é possível realizar simulações e previsões com dados semanais, se disponíveis.

1.5. Organização da Tese

Além deste capítulo introdutório, a tese está organizada em mais seis capítulos, sendo que os capítulos dois a quatro fornecem os elementos básicos e as motivações necessárias para a discussão, desenvolvimento e utilização do modelo de previsão do preço spot no quinto e sexto capítulos. O sétimo capítulo traz as conclusões e futuros trabalhos. A seguir, são descritos brevemente os capítulos do corpo da tese.

No segundo capítulo é apresentado um breve histórico do surgimento dos mercados de energia elétrica no Brasil e no mundo. Mostram-se os objetivos e fatores comuns às mais importantes reformas do setor e, neste contexto, são abordados os desafios e perspectivas da previsão do preço da energia em um ambiente competitivo. As principais classificações para os modelos de reestruturação e as correntes mercadológicas são apresentadas. Também são destaques deste segundo capítulo os tipos de mercados de eletricidade e os modelos para sua política.

O terceiro capítulo trata do sistema elétrico brasileiro, do problema de despacho e formação do preço da eletricidade, dando ênfase nos sistemas

hidrotérmicos com base hidráulica, como o brasileiro. As bases para o cálculo do preço spot de energia elétrica no Brasil são apresentadas neste capítulo.

No quarto capítulo são identificados os principais riscos na contratação de energia elétrica. São apresentados também os meios usuais para medi-los e mitigá-los.

O quinto capítulo constitui o capítulo principal da tese, propondo uma metodologia para a previsão do preço de curto prazo (spot) da energia elétrica baseada em sistemas neuro-fuzzy e nos modelos da cadeia de planejamento da operação. Além disso, a teoria dos sistemas neuro-fuzzy (ANFIS) é apresentada.

O sexto capítulo apresenta estudos de caso com os modelos de previsão e diversas comparações são realizadas. Finalmente, o sétimo capítulo discute as conclusões do trabalho e apresenta propostas para possíveis trabalhos futuros. Esta tese inclui ainda referências bibliográficas.