

1 Introdução

1.1. Motivação

O Mercado de energia elétrica no Brasil e no mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, vem crescendo a taxas maiores que dos Produtos Internos Brutos. No mesmo passo o volume do mercado livre brasileiro cresceu e já representa 25% de toda a energia do Sistema Interligado (www.ccee.org.br) Estudos realizados pela consultoria Andrade e Canellas (Canal Energia, 2011) mostram que o potencial deste mercado é de 51% do Sistema Interligado. Esta tendência faz com que o mercado de atuação das comercializadoras seja cada vez mais promissor e os novos produtos associados às contratações bilaterais de energia serão cada vez mais valorizados pelos consumidores e poderão ser decisivos para a definitiva consolidação do Ambiente de Livre Contratação (ACL). Produtos como, por exemplo, a comercialização de derivativos de energia para *hedge*¹ permitirá aos consumidores adquirir contratos futuros de energia com menor risco.

No Brasil, o comportamento dos preços da energia elétrica no mercado de curto prazo (PLD - Preço de Liquidação das Diferenças) é especialmente incerto. A justificativa para esse comportamento é algo paradoxal, pois uma das principais vantagens da geração hidráulica de energia elétrica no Brasil é a possibilidade de armazenagem de grandes volumes de água, de maneira a regular a vazão dos rios e garantir geração de energia para cenários de estiagem. Entretanto, atualmente com a elevação da construção de projetos de hidrelétrica a “fio d’água” o sistema depende cada vez mais da afluência presente, pois a razão entre a capacidade de armazenamento e a demanda é cada vez menor.

Diante disto o gerenciamento do despacho é influenciado pela afluência e pelo nível dos reservatórios, sendo que a incerteza no início de cada período hidrológico é muito grande. Como conseqüência, a forte incerteza sobre o preço da energia elétrica implica em risco para todos os agentes econômicos do setor, em particular aos geradores e comercializadores.

¹ Em finanças, uma estratégia de *hedging* consiste em realizar um determinado investimento com o objetivo específico de reduzir ou eliminar o risco de outro investimento ou transação.

Em janeiro de 2008 o preço de curto-prazo (PLD) no Brasil chegou ao valor máximo de cerca de 500 R\$/MWh e não tem sido incomum em sistemas hidráulicos como o brasileiro volatilidades superiores a 100% nos preços de curto-prazo.

Por outro lado no sistema elétrico brasileiro existem influências “externas” ao modelo de precificação como a aplicação dos procedimentos operativos: “nível meta²” e a “curva de aversão ao risco³” que provocam um “despacho” de usinas térmicas não apontadas no modelo e criam uma “artificialidade” no preço. O uso destas usinas térmicas na programação diária do Operador Nacional do Sistema reduz a necessidade de geração hidráulica e como consequência geram um aumento do nível dos reservatórios e, provável, posterior redução do preço.

Esta diminuição do preço verificada na prática nos meses seguintes a aplicação dos procedimentos operativos, não é apontada no primeiro momento pelo sistema computacional atual, e decorre do fato do nível real dos reservatórios tenderem a ficar acima do esperado pelo modelo que não “enxerga” o despacho das térmicas mencionado no parágrafo anterior.

Além disso, nos meses seguintes quando é inserido nos dados de entrada um nível de reservatório mais alto o Newave⁴ verifica o excesso de água (matéria prima de geração mais barata) e a aponta, com atraso, os preços mais baixos que nas rodadas do modelo dos meses anteriores.

No Brasil, além do Newave, pode-se verificar alguns estudos de modelo com abordagens para a previsão dos preços tais como os modelos empíricos (Silva, 2001), as séries temporais (Sousa, 2003; Amaral, 2003; Amaral & Souza, 2002) e os modelos baseados no despacho (PSRI, 2000), que são utilizadas por alguns agentes em complemento ao sistema atual, mas o uso do Newave é muito preponderante as demais que ainda não apresentaram, na prática, resultados confiáveis.

² Nível mínimo de partida previsto para os reservatório no início do período úmido (novembro) e caso o modelo aponte que os níveis poderão ser violados algumas térmicas “definidas pelo CMSE” são despachadas “fora da ordem de mérito”

³ Curva mensal e bianual de armazenamento dos reservatórios por submercado na qual quando é verificada a “violação” deste limite todas as térmicas do subsistema são acionadas “fora da ordem de mérito”

⁴ Sistema computacional utilizado pelo ONS com o objetivo de otimizar a política de operação energética num horizonte de médio prazo (5 anos) e também, em conjunto com o Decomp, para gerar os preços do mercado de curto-prazo (PLD).

Nos mercados de energia desenvolvidos, como na Europa e nos Estados Unidos, é comum a negociação de flexibilidades tais como: *take or pay*, opções de compra, opções de venda, contratos *collar* e demais produtos típicos do mercado financeiro de derivativos. O cálculo do preço destas opções, quando existem fatores de incerteza, que neste caso é o preço de curto-prazo, pode ser feitos por diversos métodos tradicionais. Entretanto, a maioria dos modelos de precificação de opções utilizada no mercado financeiro se mostra deficientes quando utilizados no setor elétrico, valorando de maneira irreal as opções e conseqüentemente podendo conduzir ao decisor a alternativas errôneas na avaliação de transações comerciais. Esta valoração incorreta é justificada devido às características da distribuição de probabilidade dos preços de curto prazo de energia elétrica. Já os métodos baseados em simulação de Monte Carlo são mais apropriados por serem uma técnica mais indicada para problemas de alta dimensionalidade ou parâmetros estocásticos.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia que, empregando técnicas de inteligência computacional e estatística, seja uma alternativa mais eficiente que os métodos tradicionais de precificação das flexibilidades contratuais. Nele é proposto o estudo e modelagem de um processo estocástico que melhor represente a formação de preço de curto-prazo no Brasil e com o uso da metodologia de opções reais calcular o preço de opções de compra e venda de energia e flexibilidades contratuais por meio de simulação de Monte Carlo, visando facilitar o cálculo para obtenção da curva ótima de decisão para precificar opções de venda ou compra energia e/ou flexibilidades.

1.3. Descrição da Dissertação

A pesquisa foi elaborada com as seguintes etapas:

- a) **Mercado de energia brasileiro:** Neste item foi estudado o modelo atual do setor e suas principais particularidades, com aprofundamento no Ambiente de Contratação Livre que é o alvo deste trabalho.
- b) **Processo de formação de preço no Brasil:** Foi estudado o modelo computacional atualmente empregado no setor elétrico (Newave/Decomp)

(CEPEL, 1999a; CEPEL, 1999b) e seus impactos no mercado de contratação.

- c) **Teoria de opções reais e derivativos:** Este estudo contou com pesquisa bibliográfica sobre teoria de opções financeiras (Hull, 2005), como base para opções reais (Dixit & Pindyck, 1994; Copeland et al., 2001; Trigeorgis, 1996), estudo dos mercado de derivativos e as principais formas de cálculo (Dixit & Pindyck, 1994; Hull, 2005).
- d) **Processos estocásticos:** Apresenta-se os diferentes processos estocásticos utilizados para representar incertezas de mercado (como por exemplo, o preço de uma *commodity*), tais como o movimento Geométrico Browniano (Dixit & Pindyck, 1994; Hull, 1999; Lazo, 2004), e o Movimento de Reversão à Média e o Processo de Reversão a Média com Saltos (Schwartz, 1997).
- e) **Algoritmo genético:** Foram estudados os princípios e principais características (conceitos, parâmetros e operadores genéticos) dos Algoritmos Genéticos (Goldberg, 1989; Koza, 1992; Michalewicz, 1996).
- f) **Modelo de processo estocástico para preço de energia:** Foi elaborado um modelo de previsão de preços tomando por base o processo estocástico de reversão a média e as particularidades do sistema de geração de energia no Brasil.
- g) **Definição do modelo para obter uma regra ótima de decisão empregando algoritmo genético:** Foi proposto um modelo baseado em simulação Monte Carlo e Algoritmos Genéticos para cálculo do valor das opções contratuais no mercado de energia elétrica. Na definição deste modelo utilizam-se funções logarítmicas e pontos livres para aproximar as curvas de gatilho de cada opção (Lazo, 2004; Dias, 2000; Dias, 2001).

1.4. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho foram:

- A definição de uma metodologia para modelar um processo estocástico baseado no processo de reversão à média empregando um algoritmo genético (Goldberg, 1989; Koza, 1992; Michalewicz, 1996) para

determinar os parâmetros desse processo que melhor representava a formação de preços no curto-prazo com horizonte de até 12 meses.

- A definição de um modelo para determinar uma regra de decisão ótima (Lazo, 2004; Dias, 2000; Dias, 2001) e conseqüente valoração das opções de compra e venda de um contrato bilateral de energia no mercado livre.

1.5. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 10 capítulos.

O capítulo 2 relata o novo modelo do setor elétrico brasileiro implementado em 2004 no país e que vigora até os dias atuais. Neste capítulo serão mostradas as principais características deste modelo e os ambientes de contratação de energia existentes.

No capítulo 3 será discutido o modelo utilizado pelo Operador Nacional do Sistema para o despacho das usinas do sistema interligado, que atualmente também é utilizado para formação do preço de energia no curto prazo e que também apresenta como dado de saída previsão de preços para um horizonte de até 5 anos e por isso influencia nas decisões de médio e longo prazos.

O capítulo 4 resume a teoria de opções reais e de derivativos descrevendo os tipos mais comuns e o método de precificação e avaliação, além dos principais derivativos já utilizados no mercado de energia brasileiro.

No capítulo 5 é apresentada a técnica de Computação Evolucionária utilizada neste trabalho: Algoritmo Genético. Nesta etapa são descritos seus conceitos básicos, parâmetros e operadores genéticos.

O capítulo 6 descreve os processos estocásticos: Movimento Geométrico Browniano, Movimento de Reversão à Média (MRM) e Movimento de Reversão à Média com saltos apresentando em quais estudos estas metodologias são enquadradas.

No capítulo 7 descreve o modelo proposto de um processo estocástico baseado no MRM e considerando as particularidades do sistema interligado nacional (SIN), ou seja, foram combinados dois movimentos de reversão a média: um para quando o preço corrente estava abaixo da média de longo prazo e outro para quando o preço encontrava-se acima. Para tanto foram utilizados algoritmos

genéticos para obtenção dos parâmetros desses processos estocástico a fim de representar de forma mais realista a formação de preço no Brasil.

O capítulo 8 descreve a metodologia proposta para o cálculo do valor de opções reais, fazendo uso de técnicas de inteligência computacional, unidas às técnicas estatísticas e à simulação Monte Carlo

O capítulo 9 apresenta os estudos de caso em que o processo estocástico definido é utilizado em conjunto com o Algoritmo Genético e simulação de monte Carlo para obter a regra ótima de decisão e o preço de opções na compra de energia de um contrato bilateral.

O capítulo 10 apresenta as conclusões baseado nos resultados obtidos e na eficácia e aplicabilidade no setor, além da proposta para os trabalhos futuros que tem por objetivo sugerir estudos adicionais que poderão aperfeiçoar os modelos e melhoras os resultados.