

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA - CAEN

MITIGAÇÃO DO RISCO DA ALTA VOLATILIDADE
DOS PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO
AUSTRALIANO

Marcos da silva Lyra

FORTALEZA-CEARÁ

2005

Marcos da Silva Lyra

MITIGAÇÃO DO RISCO DA ALTA VOLATILIDADE DOS PREÇOS DA
ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO AUSTRALIANO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Economia, Área de Concentração em Economia de Empresas, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia.

FORTALEZA- CE

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

LYRA, Marcos S. **Mitigação do Risco da alta volatilidade dos preços da energia elétrica no mercado australiano** 2005. Dissertação (Mestrado) – Centro de Aperfeiçoamento de Economistas do Nordeste – CAEN, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará.

Inclui bibliografia.

MARCOS DA SILVA LYRA

MITIGAÇÃO DO RISCO DA ALTA VOLATILIDADE DOS PREÇOS DA
ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO AUSTRALIANO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Economia, Área de Concentração em Economia de Empresas, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Economia.

Aprovada em: 02 de Maio de 2005

BANCA EXAMINADORA

Prof. Paulo de Melo Jorge Neto, Phd
Orientador

Prof. Ronaldo de Albuquerque e Arraes, Phd
Membro da Banca Examinadora

Prof. Emerson Luís Lemos Marinho
Membro da Banca Examinadora

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo das características e comportamento dos preços da eletricidade no mercado de energia elétrica australiano, faz a análise de modelos de simulação dos preços da eletricidade, como também da precificação de opções de compra para a mitigação do risco da elevada volatilidade dos preços da energia no setor elétrico. A pesquisa tem como objetivo analisar as características e extrair os parâmetros do preço da energia elétrica no mercado livre australiano, como também propor instrumentos de derivativos para utilização em contratos de hedge. Uma avaliação deste estudo mostra que devido às particularidades dos preços da eletricidade, é necessário o emprego de modelos de precificação mais abrangentes, que capturem as peculiaridades intrínsecas dos preços da energia elétrica. Neste sentido, foi elaborado um programa em planilha excel, baseado no modelo Mean Reversion with Jump Diffusion (reversão à média com difusão de saltos), a fim de extrair os parâmetros de calibração, simular o comportamento dos preços no mercado de eletricidade a cada meia hora, precificar opções e simular os resultados em cenários variados. Para isso foram utilizadas combinações de Prêmio da opção, volume de proteção contratada em MWh e preço de exercício. O simulador utilizou o modelo de alternância entre dois regimes (regime de reversão à média e regime de salto) para modelar o comportamento dos preços da eletricidade, como também para a precificar o prêmio da opção de compra. Como resultado o simulador apresenta valores de prêmio de opção, preço de exercício e quantidade de energia contratada que minimizam os custos com compra de energia e conseqüentemente o risco para os agentes do setor. O setor elétrico brasileiro ainda se encontra distante do modelo de livre concorrência, pois os contratos atualmente firmados são caracterizados por contratações de energia de longo prazo, além disso as regras no setor elétrico brasileiro estão mudando com frequência, trazendo incerteza e pouca competitividade para este mercado.

ABSTRACT

This dissertation presents a study of the characteristics and behavior of the electricity prices in the free electricity power market. Models for spot price simulation as well as for option pricing are analyzed. Those options are used for hedging the risk of the high volatility in electricity prices. This research has the objective of analyzing the characteristics of electricity price in the power market, obtain the parameters to calibrate a simulator and propose derivative tools for hedging contracts. An evaluation of this study, shows that due to particularities in the electricity prices, it is necessary to use models with a more complex pricing process, which can capture the peculiarity of the electricity prices. Based on it, an excel worksheet using the mean reversion jump diffusion model was built. Those worksheets are able to extract the parameters of the electricity price, calibrate the model, simulate the behavior of the prices in the power market, pricing options and simulate results in several scenarios. To accomplish it, a combination of option price, amount of energy protection and strike price where used. The simulator uses the regime switching model with two regimes (mean reversion regime and the jump regime) for shape the behavior of the electricity prices, as well as for pricing a call option. The objective of the simulation is to find a strike price, an option premium and a volume of energy to be contracted that minimize the costs with electricity purchase and maximize the return. The result of the simulations showed that the probability to obtain positives scenarios (lower costs with electricity purchase) with the use of call options is much higher than without them. Based on it the use of derivative for risk minimization in the free electricity power market becomes essential for all the agents in this sector. The Brazilian electricity power market is still far from this model, due to the fact that the contracts are signed for a long term period, where the volume of energy and its price are already determined. Besides the rules for this market is still being reviewed, causing uncertainty and low interest for new investors.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Variação do preço da eletricidade no mercado australiano – NSW.....	12
GRÁFICO 2 - Movimento browniano – Preços simulados sem componente de direção.....	16
GRÁFICO 3 – Movimento Browniano com Componente de Direção.....	16
GRÁFICO 4 - Preço spot da eletricidade no mercado australiano – NSW 2000.....	18
GRÁFICO 5 – Comparativo da simulação utilizando o movimento browniano com reversão à média e o movimento browniano puro.....	21
GRÁFICO 6 – Velocidade de reversão à média X Volatilidade.....	22
GRÁFICO 7 - Curva de preços spot do mercado Mid Continent Area Pool (MAPP) – EUA (Abr97 a Abr00).....	25
GRÁFICO 8 – Modelagem da curva de preço com reversão à média e Saltos.....	30
GRÁFICO 9 – Prêmio e Lucro de uma Opção de Compra.....	37
GRÁFICO 10 – Prêmio e Lucro de uma Opção de Venda.....	38
GRÁFICO 11 - Comparativo entre preços reais e preços simulados pelo processo de reversão à média com difusão de saltos.	42
GRÁFICO 12 – Volatilidade de contratos de opção em diferentes vencimentos.....	44
GRÁFICO 13 – Comparativo entre a média móvel de 1 mês com e sem picos.....	59
GRÁFICO 14 – Extração de parâmetros no mercado Australiano NSW no ano 2000.....	60
GRÁFICO 15 - Obtenção das curvas α e σ em planilha excel.....	62
GRÁFICO 16 – Curvas de reversão à média do mercado NSW ao longo de seis anos.....	63
GRÁFICO 17 – Taxa de crescimento dos preços de eletricidade no mercado NSW.....	64
GRÁFICO 18 – Quantidade de Preços de pico no mercado NSW entre os anos 1999 à 2004.....	63
GRÁFICO 19 – Amplitude média dos preços de pico no mercado NSW entre os anos 1999 à 2004.....	67
GRÁFICO 20 – Comparação entre diferentes razões de reversão de pico.....	68
GRÁFICO 21 – Curvas da volatilidade máxima e mínima do mercado NSW entre os anos 1999 e 2004.....	69
GRÁFICO 22 – Curvas velocidade de reversão à média máxima e mínima do mercado NSW - anos 1999 a 2004.....	70
GRÁFICO 23– Consumo de energia elétrica no mercado NSW no ano de 2004.....	70
GRÁFICO 24 – Crescimento do consumo de energia elétrica no mercado NSW entre os anos 2000 e 2004.....	71
GRÁFICO 25 – Exemplo de calibração das variáveis aleatórias ε_1 e ε_2	72
GRÁFICO 26 - Curvas de preço modeladas para o mercado NSW.....	76
GRÁFICO 27 - Valor do prêmio da opção em diferentes vencimentos.....	78
GRÁFICO 28 - Avaliação da aplicação de contratos de opção para todos os meses do mercado australiano NSW.....	83
GRÁFICO 29 - Avaliação da aplicação de contratos de opção em janeiro para o mercado NSW.....	84
GRÁFICO 30 - Comparativo entre curvas de preços spot simuladas com $\alpha_p = 20\%$ e $\alpha_p = 100\%$	85
GRÁFICO 31 - - Média de preço horários dos dias úteis do mercado NSW para o ano de 2004.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparativo entre Modelos de Precificação de Opção.....	46
TABELA 2 – Extração dos parâmetros do Mercado australiano NSW.....	58
TABELA 3 – Demonstração do cálculo da curva de reversão à média em planilha excel.....	59
TABELA 4 – Planilha de cálculo da volatilidade e da razão de reversão à média.....	61
TABELA 5 - Quantidade de picos extraídos do mercado NSW para 6 anos.	65
TABELA 6 – Amplitude máxima e média dos picos extraídos do mercado NSW para 6 anos.....	66
TABELA 7 – Levantamento do intervalo de maximização de retorno com utilização de opção.....	81
TABELA 8 - Levantamento dos valores finais de maximização de retorno com utilização de opção.....	82
TABELA 9 - Levantamento dos valores de maximização de retorno com utilização de opção em cenários com $\alpha_p = 20\%$	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Evolução da curva de demanda e de preços no mercado Inglês.....	09
FIGURA 2 - Constituição do mercado de energia elétrica australiano.	47
FIGURA 3 - Propriedade dos ativos do NEMMCO.....	48
FIGURA 4 - Agendamento dos geradores do NEM.....	52
FIGURA 5 – Planilha para modelagem dos preços spot da eletricidade.	75
FIGURA 6 - Planilha de cálculo do preço da opção de compra.....	76
FIGURA 7 - Planilha para geração de cenários.	79

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	2
CAPÍTULO 1	8
1 - Características do preço da energia elétrica nos principais mercados livres	8
CAPÍTULO 2	13
2 – Modelando os preços da energia elétrica através de processos estocásticos	13
2.1 – Movimento Browniano – MB.....	13
2.1.1 – Desvantagens do modelo MB.....	17
2.2 - MB com reversão à média.....	18
2.2.1 - Nível de reversão à média e razão de reversão à média	21
2.2.2 – Vantagens do modelo MB com reversão à média	23
2.2.3 – Desvantagens do modelo MB com reversão à média	23
2.3 - MB com reversão à média e saltos.....	24
2.3.1 - Comportamento do preço a vista da eletricidade.....	24
2.3.2 - O Processo de difusão de saltos aplicado aos preços da energia elétrica	26
2.3.3 - Parâmetros do modelo MB com saltos.....	26
2.3.4 - Desvantagens do modelo MB com reversão à média e difusão de picos.	29
2.4 – Alternância entre regimes (Regime Switching).....	31
CAPÍTULO 3	34
3 – Contratos derivativos.....	34
3.1 - Contratos a Termo.....	34
3.2 - Contratos Futuros.....	34
3.3 - Relação entre Preço Futuro e Preço a vista	35
3.4 – Contrato de Opção.....	36
3.4.1 - Opções de Compra	36
3.4.2 - Opções de Venda.....	38
3.4.3 - Combinações de Opções	39
CAPÍTULO 4	40
4 – Precificação de Opções em Mercados de Energia Elétrica.....	40
4.1 - Cenários extremos de preço	41
4.2 Precificação de opções de compra (Call) de eletricidade	43
CAPÍTULO 5	47
5 – Introdução ao Mercado Nacional de eletricidade australiano - Australian National Electricity Market (NEM) ...	47
5.1- O Mercado a vista	48
5.2 - Confiabilidade e segurança	49
5.3 - Operação do NEM.....	51
5.3.1 - Demanda	51
5.3.2 - Suprimento	52
5.4 - Agendamento e despacho de geradores.....	52
5.5 - Determinação do preço a vista	54
5.6 - Previsão da demanda do mercado	54
CAPÍTULO 6	56
6 – Resultado da simulação no mercado australiano	56
Equação para Precificação da opção de compra	56
6.1 - Extração de parâmetros	57
6.2 - Construção e calibração do simulador.....	63
6.2.1 Escolha dos parâmetros de calibração	63
6.2.2 - Construção do simulador.....	73
6.3 – Simulação e Obtenção dos Resultados	80
6.4 – Considerações sobre a simulação	84
CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

INTRODUÇÃO

A história de reestruturação do setor elétrico iniciou-se na Inglaterra nos anos 80. O sucesso do modelo britânico incentivou governos no mundo inteiro a promover a liberalização em mercados de energia. No Brasil, a reforma do setor começou no governo Fernando Henrique Cardoso, com a criação da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica). O projeto RE-SEB elaborou o modelo do setor, definindo o marco regulatório que criou o ONS e o MAE, determinou a desverticalização da cadeia, mantendo transmissão e distribuição como monopólios regulados, e instituiu a competição na geração e na comercialização. Entretanto, enquanto o marco regulatório ainda era discutido, o mesmo governo iniciou o processo de privatização de empresas de distribuição e de geração. Em 1999, a privatização foi transferida para o Ministério de Minas e Energia que interrompeu o processo. Em 2001, com a crise de energia, o governo trouxe a condução do processo de liberalização para a Casa Civil, voltou a responsabilidade da privatização para o BNDES e criou a Câmara de Gestão da Crise de Energia (CGCE). A CGCE atuou em temas críticos para ajustar o modelo, visando a continuidade da liberalização. Entretanto, a primeira decisão do novo governo (de Luiz Inácio Lula da Silva) foi a de não dar continuidade à CGCE, indicando que novas regras seriam definidas. Em março de 2004, o governo sancionou a Lei nº 10.848 que, entretanto, precisa de regulamentação complementar. A lei modifica a forma de comercialização de eletricidade, com o objetivo de assegurar a expansão do sistema, atraindo investidores através de contratações entre agentes geradores e distribuidores. Determina diferenças entre a geração existente e a de novos empreendimentos e prazos de contratação de até 35 anos. Porém, a proposta prejudica os investimentos recentes em geração, uma vez que estes competirão com usinas de menor custos, que têm parte de seus investimentos amortizados. Além disso, define que as empresas do grupo Eletrobrás não serão privatizadas, que é incoerente com a intenção de se atrair capital privado. Atualmente as empresas de geração estatais detêm cerca de 75% da capacidade do país e a concentração de mercado na geração é crítica na modelagem do setor, pois pode prejudicar a intenção de se implantar o programa de parcerias público-privadas. No Reino Unido, o regulador mantém um acompanhamento do poder de manipulação dos geradores sobre os preços de mercado. Outra decorrência do novo modelo de comercialização é a inibição de mecanismos para mitigar riscos, fundamentais no

desenvolvimento de mercados de energia. No “Nord Pool”, formado por Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca, o mercado para negociação de exposição de energia movimentou mais do que o dobro do consumo físico. Entretanto, a maior incoerência é com relação às cerca de 46 milhões de unidades consumidoras da classe residencial. O novo modelo posterga a possibilidade de livre escolha de fornecedores de energia, que seria a única forma de promover queda real de preços no mercado residencial. No Reino Unido, os preços caíram 25% para consumidores residenciais depois da ampla abertura da competição. Há grande expectativa com a complementação da nova lei. A frequência e forma das licitações impacta a estratégia de venda e aquisição de energia das geradoras e distribuidoras. Além disso, as amarrações contratuais do novo ambiente regulado expõem as empresas a riscos e é importante que o governo determine formas de gerenciamento de exposição mais flexíveis e incentive a criação de mecanismos de mercado para a mitigação de riscos. A desverticalização de empresas distribuidoras deve ser implantada, buscando a distinção dos custos da energia e seu transporte, abrindo espaço para o realinhamento tarifário. É importante que o aumento da participação do Estado na Aneel e no ONS não iniba o funcionamento do mercado. O governo precisa agir com determinação para mostrar que, apesar das mudanças no modelo setorial, no médio e longo prazo, o setor estará menos sujeito à interferências políticas (Giovanni Tessitore, 2004) .

Devido ao setor elétrico brasileiro estar no processo de definição das regras e ainda não possuir um mercado livre, onde os preços são negociados baseados na oferta e demanda de energia em cada momento, como também por possuir contratos de longo prazo com geradores e não ter altas variações dos preços no mercado a vista para seus consumidores finais, decidiu-se estudar um mercado livre específico que permitisse empregar ferramentas do mercado financeiro com função de mitigação de risco. Desta forma adotou-se o mercado australiano devido à sua maturidade como mercado livre, como também pela disponibilidade de dados de consumo e preço a cada meia hora para um período de 6 anos.

Entender o comportamento dos preços da eletricidade, bem como explorar a utilização dos instrumentos de derivativos nos mercados livres do setor elétrico, foi a motivação principal para a realização deste estudo, assim como a busca de um tema que contribuísse para o aperfeiçoamento dos estudos de gestão de negócios em energia elétrica.

Esta dissertação foca tanto o estudo das características dos preços da energia elétrica, como também a avaliação de uma nova aplicação dos instrumentos de derivativos na área de energia elétrica, utilizando a eletricidade como um bem que pode ser negociado no mercado futuro ou no mercado a vista, sendo, para os agentes deste setor, uma nova maneira de captação de recurso a um custo baixo em relação aos preços praticados no mercado a vista liberalizado.

Atualmente no Brasil o setor elétrico passa por reestruturações, cujo objetivo é promover a livre concorrência e a ampla competição entre as empresas que prestam os serviços no sistema. No entanto, estas necessitam ter maior participação da iniciativa privada para promover a expansão do setor e aumentar a capacidade da geração instalada no país e conseqüentemente introduzir uma livre comercialização da energia.

O mercado de energia elétrica em todo o mundo vem sendo gradativamente desregulado em seus processos de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia.

O que anteriormente era controlado através da fixação de preços como função dos custos de suprimento, agora representa uma interação competitiva de estruturas complexas de oferta e demanda, resultando em preços no mercado de eletricidade, que são dinâmicos e incertos. Fatores que influenciam na demanda agregada dos distribuidores de energia elétrica incluem, tempo/clima, estação do ano, concentração regional e localização dos consumidores varejistas. A demanda agregada é também influenciada pela localização dos geradores, sua concentração física, estrutura de transmissão, interconexão entre regiões e o processo de leilão de energia. Como resultado, os preços destes mercados desregulados são caracterizados por uma alta volatilidade, cuja amplitude varia com o tempo e ocasionalmente alcança níveis extremamente elevados, comumente conhecidos como “preços de pico” (GOTO,2003).

A elevada volatilidade e freqüentes saltos no preço da energia são ocasionados, principalmente, por problemas no sistema elétrico, pela elevação sazonal da demanda e comportamento inelástico da mesma. Quanto mais desregulado é o mercado de eletricidade, maior se torna a exposição de seus participantes aos riscos inerentes, por isso, um processo de precificação adequado com elaboração de portfólios e de modelos de gestão de risco devem ser diferenciados para este setor.

Entender o processo de volatilidade dos preços da energia elétrica é crucialmente importante para as distribuidoras, geradoras e reguladores deste mercado, uma vez que este influencia nos preços dos contratos de derivativos negociados no mercado de energia elétrica, que, por sua vez, permitem que as empresas do setor possam melhorar a gestão de seus riscos financeiros com a compra de eletricidade.

O que diferencia a eletricidade de outros bens, é o fato de que a energia elétrica não é um bem armazenável, além disso, depende das características físicas do sistema elétrico local para a entrega ao consumidor final. Quando o fluxo de energia exigido (demanda) não é comportado em sua íntegra pelas redes de transmissão e ou distribuição, devido à limitações de transporte, o impacto é sentido sobre a curva de oferta e demanda de forma intensa. Outra peculiaridade do setor elétrico é a existência de fatores intrínsecos a determinadas regiões, tais como, tamanho e concentração das geradoras, distribuidoras e comercializadoras. Estes fatores associados ao clima de cada localidade acabam por influenciar nos preços a vista da energia elétrica, fazendo com que estes assumam amplitudes e volatilidades distintas nos diferentes mercados. No entanto os preços da eletricidade podem convergir, no curto e médio prazos, para valores mais homogêneos nas distintas regiões, caso haja uma maior interconexão do sistema de transmissão entre mercados separados geograficamente e/ou eletricamente.

A eletricidade por ser um bem necessário e essencial à população possui uma variabilidade de demanda relativamente previsível ao longo do ano, cujas principais características são seu alto grau inelástico, ser fortemente influenciada por atividades econômicas e políticas como também pelo fator climatológico. Quando o nível de demanda está baixo, as geradoras produzem energia com custo marginal reduzido, porém durante as estações de inverno e/ou verão, em determinados dias da semana ou mesmo em horários de pico de consumo, maiores quantidades de energia são demandadas e, como consequência, geradoras com custo marginal mais elevado acabam sendo despachadas no sistema para suprir as necessidades do momento. Estes aumentos de demanda tendem a elevar o nível dos preços, gerando um grande incentivo, por parte das geradoras, em despachar até o mais caro gerador de energia, no entanto, devido a estes serem eventos de curta duração ou mesmo pontuais, espera-se, que, no curto prazo, haja um

elevado grau de reversão a uma média histórica de preços, quando os efeitos causadores do aumento de demanda cessarem.

Segundo Goto (2003), apesar da alta volatilidade registrada nos preços de energia elétrica dos mercados mais desenvolvidos do mundo, existe pouca demanda para as opções de proteção (Hedge) de eletricidade. Uma das razões pelo desinteresse nestas opções, pode vir da incerteza sobre como precificá-las.

É complexa a análise de como os diferentes fatores mencionados anteriormente influenciam na volatilidade do preço da energia elétrica e, por isso, a precificação e “Hedging” deste bem ainda representa um importante desafio.

Este trabalho focou o estudo do comportamento e evolução dos preços da energia elétrica do mercado australiano, de forma a avaliar suas características mais marcantes e comuns e poder modelar seu comportamento futuro, criar e precificar seguro de mitigação de risco como também avaliar prováveis cenários deste mercado e ganhos/perdas com a utilização de opções de compra.

Foi escolhido especificamente o mercado australiano, devido à sua maturidade e a facilidade de obtenção de dados, como também possuir alta volatilidade e frequentes picos nos preços a vista da eletricidade.

Devido à eletricidade ser um bem não armazenável, derivativo do mercado financeiro não deve ser utilizado diretamente para propósitos de proteção neste setor sem antes serem reelaborados, pois as particularidades deste mercado fazem com que os métodos de precificação convencionais, geralmente, não funcionem para a precificação dos preços e de seguros de risco no mercado de energia elétrica.

Os preços da energia elétrica são caracterizados por abruptas mudanças sem aviso prévio, conhecidas como “saltos” ou “picos”, onde em mercados desregulados, empresas que não estão preparadas para gerir o crescente risco destes saltos de preço, podem ver suas receitas, de todo um período, se evaporarem em questão de horas. Para minimizar este efeito será introduzido um modelo de precificação da energia elétrica, cuja principal característica é a reversão à média com difusão e saltos (Mean Reversion with Jump Diffusion), que se propõe a simular, com maior precisão, a real oscilação dos preços da energia elétrica ao longo do tempo.

Diante das características do preço a vista da eletricidade, é importante a adoção de instrumentos de derivativos nos mercados livres de energia elétrica, de forma a se obter uma melhor gestão de risco através de precificações mais eficientes, que possam agregar maior benefício econômico-financeiro ao negócio. Adotar-se-á um modelo estatístico mais flexível, que permita a utilização de parâmetros tais como sazonalidade, regressividade e saltos ocasionais aplicados aos preços a vista a cada meia hora.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos e a presente introdução, que aborda o problema de pesquisa, a justificativa e o objetivo.

O primeiro capítulo destaca as características do preço da energia elétrica nos principais mercados livres. O segundo capítulo discorre sobre os vários modelos de simulação de preços com a utilização do movimento browniano, reversão à média e saltos. O terceiro capítulo aborda a teoria dos contratos de derivativos, identificando os tipos de contratos existentes. O quarto capítulo enfoca a precificação de opções de compra em mercados de energia elétrica para utilização como hedge. O quinto capítulo faz uma explanação sobre o funcionamento do mercado de energia elétrica australiano.

O sexto capítulo apresenta a construção e calibração de um simulador como também a obtenção dos resultados.

CAPÍTULO 1

1 - Características do preço da energia elétrica nos principais mercados livres

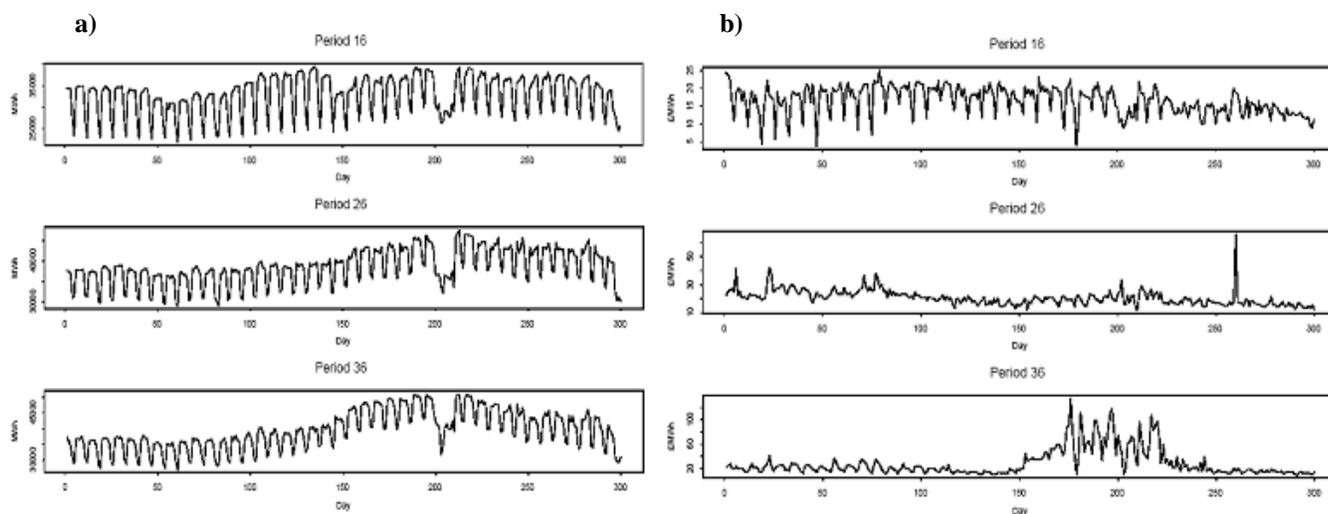
As características do preço do bem energia elétrica são, de certa forma, diferentes das características dos preços de outros bens utilizados com mais freqüência nos mercados financeiros com a finalidade de “Hedge” (proteção), além disso, devido à necessidade de suprimento de curto prazo e eventuais desbalanceamentos de demanda no mercado de eletricidade, os preços para despacho (fornecimento) da energia elétrica no curto prazo tendem a exibir um comportamento significativamente diferente e mais instável com relação aos preços para despacho no longo prazo.

Segundo Bunn (2003), o ponto principal para a formação do preço da energia elétrica é sua natureza instantânea de despacho, ou seja entrega imediata do produto. As leis físicas que determinam a entrega da eletricidade através das linhas de transmissão requerem um sincronismo balanceado entre as geradoras, as distribuidoras e os consumidores. A geração e o consumo de eletricidade devem estar perfeitamente sincronizados, pois se estes se tornam desbalanceados por apenas um instante, a freqüência e a voltagem da energia elétrica tendem a flutuar, comprometendo a confiabilidade do sistema. A tarefa do operador do sistema é monitorar continuamente a demanda de eletricidade, de forma a intervir no volume de energia despachada, acionando, quando necessário, geradores com capacidade de resposta imediata.

A maioria dos mercados de energia elétrica é despachada de forma horária ou a cada meia hora, fazendo com que ao longo do dia, as geradoras ofertem preços distintos para diferentes intervalos de tempo. Quando se compara a variação de demanda com a variação de preço para um mesmo período, percebe-se que a série de preços exibe uma volatilidade muito maior do que a série de demanda, principalmente devido ao agendamento de diferentes geradores para suprir a demanda solicitada no momento. Comparando as figuras 1a e 1b, onde se mostra respectivamente a evolução da demanda para três intervalos horários durante um ano e os preços correspondentes deste mesmo intervalo, percebe-se claramente que os preços da energia elétrica mostram uma estrutura muito mais complexa do que simplesmente ser uma função linear da demanda que refletiram os custos marginais de geração.

Na figura 1b, percebe-se que as características intrínsecas dos preços da energia elétrica; Reversão à média de longo prazo (e.g. Johnson and Barz, 1999), Sazonalidade (diária, semanal, anual), rápida reversão de picos e não normalidade (percebida pelo grau de assimetria). Os preços a vista também mostram volatilidade bem mais elevada do que qualquer outro commodities ou ativo financeiro, onde a amplitude é variável no tempo e influenciada pela demanda, capacidade de geração e transmissão, como também pelo volume de energia negociado (e.g. Escibano et al. 2001).

FIGURA 1. Evolução da curva de demanda e de preços no mercado Inglês.



FONTE: London Business School – 2003.

A figura 1 mostra também um comparativo entre a curva de demanda de energia e a curva respectiva de preços para três períodos de carga diferentes: 16 (6.30-7am), 26 (11.30-12pm) e 36 (4.30-5pm) em 6 de Junho de 2001 a 1 de Abril de 2002 no mercado inglês.

Existem fatores que podem explicar algumas das características dos preços da energia elétrica. A observação mais simples é que uma diversidade de plantas geradoras com diferentes tecnologias e combustíveis introduzidas no sistema com diferentes níveis de demanda estarão ofertando preços para despacho no mercado. Além disso, existem razões para esta diversidade de plantas, uma delas é obsolescência das geradoras, cuja vida útil é em média de 40 anos. Novas tecnologias são sempre introduzidas, tornando a geração mais eficiente e fazendo com que os preços flutuem de acordo com a necessidade de utilização de cada planta. Outra razão para a

diversificação de geradoras é devido à natureza instantânea de despacho da energia elétrica. A geradora mais eficiente com o custo marginal mais baixo irá operar continuamente, em contrapartida, as geradoras com custo marginal mais elevado irão entrar em operação esporadicamente durante períodos de picos de demanda ou falta de capacidade de geração. A recuperação de capital, para estas plantas emergenciais, geralmente são alcançadas em questão de poucas horas de operação, comparado com as 8760 horas por ano que uma planta normal de geração opera. Este esquema favorece tanto a construção de plantas de geração com altos custos de operação para os momentos de picos de demanda, como também a construção de plantas que operam 100% do tempo com custo marginal de operação mais baixo.

Para Karakatsani (2003), o combustível utilizado e conseqüentemente seu preço a vista, também exercem uma forte influência na volatilidade dos preços, como também contribuem para reversão à média histórica de custos de produção.

A alta volatilidade de longo prazo dos preços a vista da energia elétrica é causada principalmente devido a associação de dois fatores:

- O processo de produção de energia elétrica é instantâneo e segue uma curva de demanda que é altamente variável.
- Uma elevada diversidade de plantas de geração com diferentes combustíveis e preços de oferta.

Outros fatores podem ser agregados para a alta volatilidade de curto prazo:

- Podem existir falhas técnicas na geração, que fazem com que plantas geradoras mais caras tenham que ser acionadas para suprir a demanda do momento.
- O sistema de transmissão de interconexão entre regiões pode se tornar congestionado e com isso plantas locais mais caras são acionadas.

Todos estes eventos refletem na formação do preço a vista da eletricidade e influenciam na escolha do modelo para a precificação dos preços da eletricidade como um commodities não armazenável cujo processo de produção e despacho é instantâneo.

Conforme Blanco (2003, p.1) e Burger (2003, p.3), são 6 as principais propriedades associadas à volatilidade do preço a vista da eletricidade:

I)Efeitos sazonais: São variações em resposta às flutuações cíclicas na oferta e na demanda da energia elétrica, na maioria das vezes devido à mudanças de temperatura ou de clima, onde o preço da energia elétrica tende a exibir um forte padrão sazonal. Todos os mercados apresentam algum padrão de sazonalidade para o consumo de eletricidade em determinadas épocas do ano e que acabam por influenciar diretamente no preço a vista da energia elétrica.

II)Preços de pico ocasionais: Grandes variações no preço da energia elétrica ocasionadas principalmente devido a problemas ou restrições na geração e/ou na transmissão, falta de energia elétrica, políticas econômicas emergenciais, etc. Estes são eventos pontuais e de curta duração, cuja característica principal é a reversão à média dos custos de produção em prazos que podem variar de horas, dias à no máximo semanas.

III)Reversão à média: O preço da energia elétrica tende a circundar uma média de preço determinada pelo custo da produção e o nível de demanda de cada período, quando de uma mudança significativa em seus valores (Ex: preço de pico – item anterior), o preço tende a retornar aos níveis médios de longo prazo, tão logo o efeito causador da variação de preço desaparecer.

IV)Preços a vista futuro: O mercado a termo fornece a melhor estimativa do preço a vista futuro para diferentes datas de vencimento. No mercado de energia elétrica, no entanto, pode haver diferenças significativas para preços futuros em períodos subsequentes, principalmente devido à alta volatilidade do preço da energia.

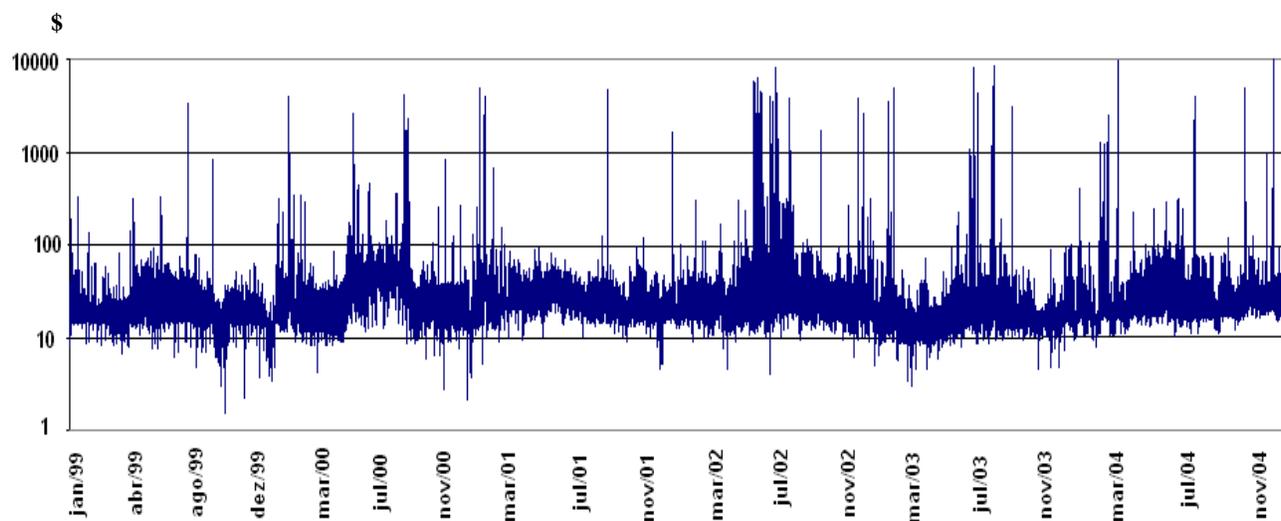
V)Bem não armazenável: Devido à sua característica de não armazenamento, a eletricidade resulta em preços futuros que não seguem um processo padrão suave de evolução como outros bens estocáveis.

VI)Diferenças regionais: A ocorrência de restrições na transmissão entre regiões (interconexão), fazem com que os preços a vista da eletricidade, como também os preços futuros, possam variar consideravelmente de região para região.

Além da sazonalidade e reversão à média, os preços futuros da eletricidade são caracterizados por volatilidade crescente à medida que a data de vencimento dos contratos se aproximam. Logo abaixo se encontra o gráfico 1 o qual fora elaborado em planilha Excel com os

dados extraídos do sub-mercado australiano NSW com medição a cada meia hora para o período de janeiro de 1999 à dezembro de 2004.

GRÁFICO 1 - Variação do preço da eletricidade no mercado australiano – NSW



FONTE: Adaptação do autor

No gráfico 1 verifica-se que os preços da energia tipicamente apresentam altas variações de volatilidade, ocasionalmente eles saltam com uma tendência de retornar rapidamente para seus valores médios de custo de produção.

CAPÍTULO 2

2 – Modelando os preços da energia elétrica através de processos estocásticos

Cada um dos processos de modelagem de preços existente possui sua vantagem e sua desvantagem, onde o processo menos complexo (com menos parâmetros) fornece uma visão mais simplificada da realidade, no entanto permite estimar as múltiplas fontes de risco com uma menor quantidade de parâmetros de simulação e, por isso, são mais fáceis de serem interpretados e calibrados pelos preços de mercado.

De acordo com Bergman, Grundy e Wiener (1996, p. 1574) uma classe de processos estocásticos, que tradicionalmente tem desempenhado papel importante na modelagem da dinâmica dos preços dos ativos objetos, é a dos processos de difusão.

A seguir veremos alguns destes processos com suas respectivas vantagens e desvantagens.

2.1 – Movimento Browniano – MB

O processo de precificação mais conhecido se dá através da utilização do movimento browniano, que leva o nome de Scottish Robert Brown, *que em 1827 descobriu que partículas dentro de suspensão de água com grãos de pólen seguiam um caminho aleatório que parecia um zigzag*. Em 1909 Einstein descobriu que o movimento browniano era causado por partículas macroscópicas num líquido como consequência dos choques das moléculas do líquido nas partículas.

Hoje em dia, o movimento browniano serve de modelo na descrição de flutuações que ocorrem nos mais diversos e inesperados tipos de sistemas. Por exemplo, praticamente a mesma descrição e o mesmo tratamento matemático de Einstein podem ser adaptados também para descrever flutuações de preços de mercadorias. Desde então o movimento browniano tem sido usado em várias áreas, incluindo finanças, para modelar o comportamento dos preços e de seguros de proteção.

David Soronow (2003, p.2) afirma que na literatura financeira o movimento browniano veio a ser chamado de “Random Walk “ (Caminho aleatório) em referencia ao caminho de um bêbado após sair de um bar a caminho de casa, onde para ele as principais propriedades do movimento browniano são que:

- As variações independem dos valores históricos (não existe memória).
- As variações possuem uma média e uma volatilidade constante

O processo estocástico do movimento browniano utilizado para modelar os preços de mercado é obtido através da seguinte equação:

$$dS_t/S_t = \mu dt + \sigma dB_t ; \text{ Onde:}$$

S_t : Preço a vista no instante t .

μdt : Direção que os preços irão seguir (componente de direção)

σ : Volatilidade

B_t : Movimento Browniano

Blanco (2004), afirma que para a maioria dos bens pode-se simular uma curva de preços futuros, que forneça o nível esperado dos preços em diferentes datas de vencimento, no entanto para alguns commodities se faz necessário introduzir uma componente de direção na tendência de evolução dos preços, de forma a se obter uma convergência para preços futuros factíveis. A orientação da direção é determinada pelo rendimento do commodities, cujo valor irá direcionar a mudança nos preços à vista. Segundo ele, em uma simulação, para se incorporar o termo de rendimento para o commodities é necessário adicionar uma componente de direção ao movimento browniano.

Suponha que o preço S_t siga o movimento browniano:

$$dS_t/S_t = \mu dt + \sigma dB_t \tag{1}$$

$$\text{ou } dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dB_t \tag{2}$$

Para encontrar a equação diferencial estocástica para $f(S_t) = \ln S_t$, seguimos os seguintes passos

$$f'(S_t) = 1/S_t$$

$$f''(S_t) = -1/S_t^2,$$

$$\text{Aplicando-se o lema de Itô : } df(S_t) = f'(S_t) dS_t + \frac{1}{2} f''(S_t) \text{Var}_t(dS_t)$$

Temos que:

$$d \ln S_t = dS_t/S_t - \frac{1}{2} \text{Var}_t(dS_t)/S_t^2 \tag{3}$$

Utilizando a regra da variância: $\text{Var}(a+bS) = \text{Var}(bS) = b^2\text{Var}(S)$, onde a e b são constantes.

$$\text{Obtem-se da eq 2 que: } \text{Var}_t(dS_t) = \text{Var}_t(\mu S_t dt + \sigma S_t dB_t) \tag{4}$$

Assumindo que S_t é conhecido no tempo t , tem-se que $\mu S_t dt$ é uma constante, não afetando desta forma a variância, logo:

$$\text{Var}_t(dS_t) = \text{Var}_t(\sigma S_t dB_t) \quad (5)$$

σS_t é também conhecido no instante t e por isso pode ser colocado na frente da variância.

$$\text{Var}_t(dS_t) = (\sigma S_t)^2 \text{Var}_t(dB_t) \quad (6)$$

Finalmente uma das propriedades do movimento browniano “Scaling” diz que:

$$\text{Var}_t(dB_t) = dt$$

Assim temos:

$$\text{Var}_t(dS_t) = (\sigma S_t)^2 dt \quad (7)$$

Substituindo-se 2 e 7 na fórmula de Itô 3 obtém-se, após alguns passos intermediários, a seguinte equação: $d \ln S_t = (\mu - \frac{1}{2} \sigma^2) dt + \sigma dB_t$

Conclui-se que se os níveis de preços seguem um movimento browniano, então o logaritmo dos preços segue o movimento browniano com uma direção diferente e vice-versa (Cerny,2004).

Segundo Hull (1993), $dB = \varepsilon \sqrt{dt}$, onde ε é um valor aleatório com distribuição normal, média zero e desvio padrão de 1.

A Equação discreta para obtenção do preço a vista com componente de direção para $\mu = r - q$ fica:

$$S(t_{i+1}) = S(t_i) \exp\left[r - q - \frac{1}{2} \sigma^2 \right] (t_{i+1} - t_i) + \sigma S(t_i) \varepsilon \sqrt{(t_{i+1} - t_i)} \quad (8)$$

r = Taxa livre de risco

q = Rendimento do commodities

σ = Volatilidade

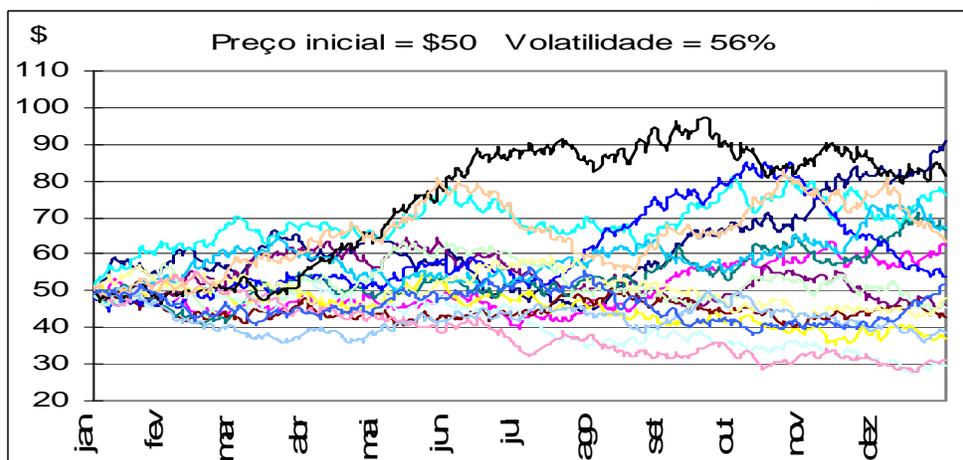
$(t_{i+1} - t_i)$ = Intervalo de tempo

ε = variável aleatória entre -1 a $+1$ e média 0 , cuja curva de ajuste é normal, assumindo qualquer valor com até duas decimais dentro deste intervalo. A determinação deste intervalo na equação discreta foi introduzida para limitar a componente aleatória dentro de uma amplitude máxima e mínima, quando seus valores são 1 e -1 respectivamente. Caso utilizássemos uma distribuição normal, conforme indicado na equação contínua, poderíamos obter valores aleatórios muito fora das magnitudes desejadas na calibração. Os valores desta distribuição dependem do histograma de calibração utilizado. Vide gráfico 25 pág 72.

\exp = Base do logaritmo natural

A equação 8 apresenta a evolução dos preços baseada no movimento browniano com componente de direção, onde o preço a vista no instante $t+1$ é função do preço a vista no período anterior t , da componente de direção e de uma componente aleatória. A componente de direção orienta a evolução da curva em uma determinada direção de acordo com os valores da taxa livre de risco, do rendimento do commodities e da volatilidade.

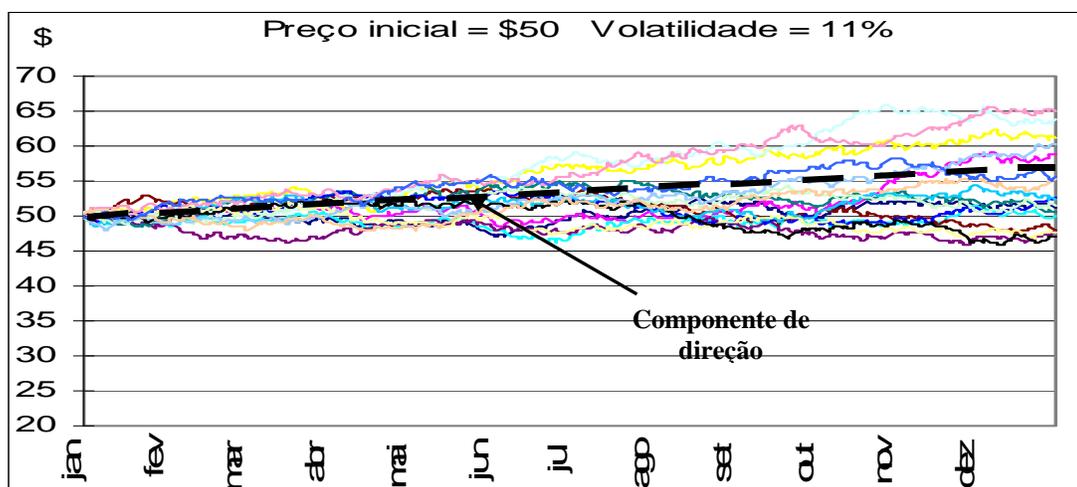
GRÁFICO 2 - Movimento browniano – Preços simulados sem componente de direção



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 2 apresenta a modelagem de 20 curvas aleatórias utilizando movimento browniano sem componente de direção, ou seja, utiliza-se apenas a componente aleatória da equação 1. O parâmetro utilizado foi $\sigma = 3\%$. As curvas foram obtidas em planilha excel utilizando 1800 linhas de informação, onde cada uma possui as informações de σ , ϵ , S_t e S_{t+1} . As curvas são plotadas através da coluna que contém a informação S_{t+1} , que representam os 12 meses de um ano.

GRÁFICO 3 – Movimento Browniano com Componente de Direção



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 3 apresenta a modelagem de 20 curvas aleatórias em planilha excel utilizando movimento browniano com componente de direção a partir da equação 8. Os parâmetros utilizados foram $\sigma = 0,8\%$; $(r-q) = -8$. Comparativamente com o movimento browniano sem componente de direção, percebe-se que a tendência geral das curvas neste processo possuem um direcionamento determinado pela linha tracejada.

2.1.1 – Desvantagens do modelo MB

Para Choi (2004), os preços de energia elétrica possuem variações significativas de lognormalidade, porém este não é um comportamento exato e único, por isso existem algumas desvantagens na utilização do MB para modelar os preços da eletricidade. Mudanças bruscas de preço podem ser subestimadas pela distribuição log-normal e conseqüentemente pela simulação através do movimento browniano, pois este não captura as variações extremas de preço de forma precisa, não sendo, portanto, adequado para a gestão de risco e a precificação de certas opções exóticas como a eletricidade.

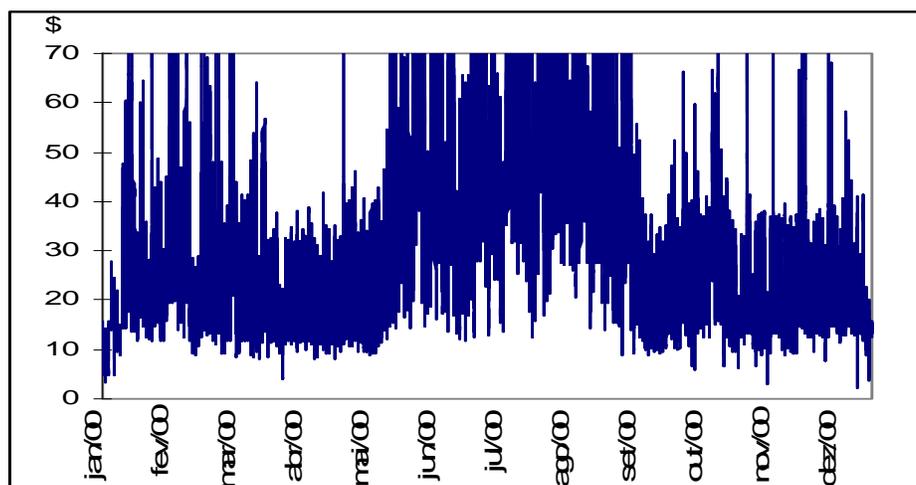
Choi afirma ainda que o único parâmetro desconhecido no movimento browniano é a volatilidade dos preços, onde o valor ideal a ser utilizado, para propósitos de modelagem, seria a volatilidade futura. Como não se pode obter a volatilidade futura até que se saiba o que aconteceu com os preços de mercado, deve-se utilizar como dado de entrada em uma simulação as expectativas de variabilidade do preço no período futuro analisado, de forma a refletir o melhor valor de volatilidade esperada.

A volatilidade para os preços da energia não é constante, pois seus valores mudam ao longo do tempo e, por isso, a utilização de volatilidades constantes pode não ser muito realista quando de uma simulação. Processos mais complexos incorporam a volatilidade com variação no tempo e alguns modelos de gestão de risco consideram ainda que a volatilidade flutua exatamente como os preços dos bens.

O resultado de uma curva simulada através do MB com alta volatilidade pode ser bastante diferente da realidade do mercado, pois em uma simulação para volatilidades extremamente elevadas, a componente de direção começa a dominar a evolução do preço, conduzindo a valores irreais. Para bens com alta volatilidade e com característica de reversão à média como a eletricidade, é altamente recomendável utilizar processos tais como o processo de reversão à

média. Além disso, os preços da energia elétrica, como também sua volatilidade, possuem uma componente sazonal muito forte que devem ser levadas em consideração durante a simulação dos preços futuros deste bem.

GRÁFICO 4 - Preço a vista da eletricidade no mercado australiano – NSW 2000



FONTE: Adaptação do autor

Observa-se no gráfico 4 a evolução da curva de preço a vista da eletricidade no mercado NSW com uma forte sazonalidade dada pela diferença entre os preços de meses consecutivos, onde a volatilidade média (incluindo os preços de pico) está em torno de 50% durante os meses de inverno (julho, agosto e setembro) e de 25% para o restante dos meses.

2.2 - MB com reversão à média

A importância da incorporação de reversão à média ao se modelar os preços de energia elétrica pode ser melhor entendida com um exemplo. Suponha que os preços da eletricidade saltam de \$30/MWh para \$150/MWh devido a um evento inesperado (falta de energia, restrição na transmissão, ondas de calor, etc), visto que estes são eventos temporários, há de se concluir que é altamente provável que os preços em algum momento retornem à seus patamares médios uma vez que o evento causador do salto desaparecer. No entanto estas expectativas são puramente intuitivas e suportadas apenas pelas observações do comportamento histórico dos preços a vista da energia elétrica.

Este exemplo mostra a limitação do movimento browniano quando aplicado ao preço da energia elétrica, pois o MB consideraria o valor de \$150/MWh como um evento normal e iria proceder aleatoriamente deste ponto através de um processo contínuo de difusão, sem levar em consideração os níveis dos preços históricos (sem memória), e sem grandes probabilidades deste retornar aos níveis médios de preços anteriores. Este resultado está claramente em contradição com a realidade do mercado, e lança o desafio de se modelar através de um processo mais complexo utilizando a reversão à média.

Soronow (2003) descreve que o caminho aleatório utilizado para modelar preços através do MB é baseado na suposição de que as mudanças de preço são independentes umas das outras, ou seja, o caminho histórico que o preço seguiu para atingir seu preço atual é irrelevante para prever o caminho do preço futuro. O processo de reversão à média pode ser classificado como uma modificação do caminho aleatório, onde as mudanças de preço não são completamente independentes uma das outras, mas, ao invés disso, são relacionadas com seus valores históricos.

A equação apresentada no artigo de Blanco (2003), para obtenção do valor a vista futuro, parte do princípio que para capturar o fenômeno de reversão à média é necessário efetuar uma modificação do princípio do caminho aleatório, chegando-se a seguinte expressão:

$S_{t+1} - S_t = \alpha (S^* - S_t) + S_t \sigma \varepsilon_t$, podendo ser expressa como:

$$S_{t+1} = S_t + \underbrace{\alpha (S^* - S_t)}_{\text{Componente de reversão à média}} + \underbrace{S_t \sigma \varepsilon_t}_{\text{Componente aleatória}} \quad (9)$$

Preço em t+1

Preço em t

Componente de reversão à média

Componente aleatória

Em que:

S^* - Nível de reversão à média ou preço de equilíbrio de longo prazo

S_t - Preço A vista

α - Razão de reversão à média

σ - Volatilidade

ε - Variação aleatória de t para t+1 com valores variando entre -1 à $+1$ e média zero.

A componente de direção desta equação foi substituída pela componente de reversão à média, devido a esta última já orientar o comportamento futuro do preço da energia elétrica, portanto não havendo necessidade de direcionar a direção do movimento aleatório.

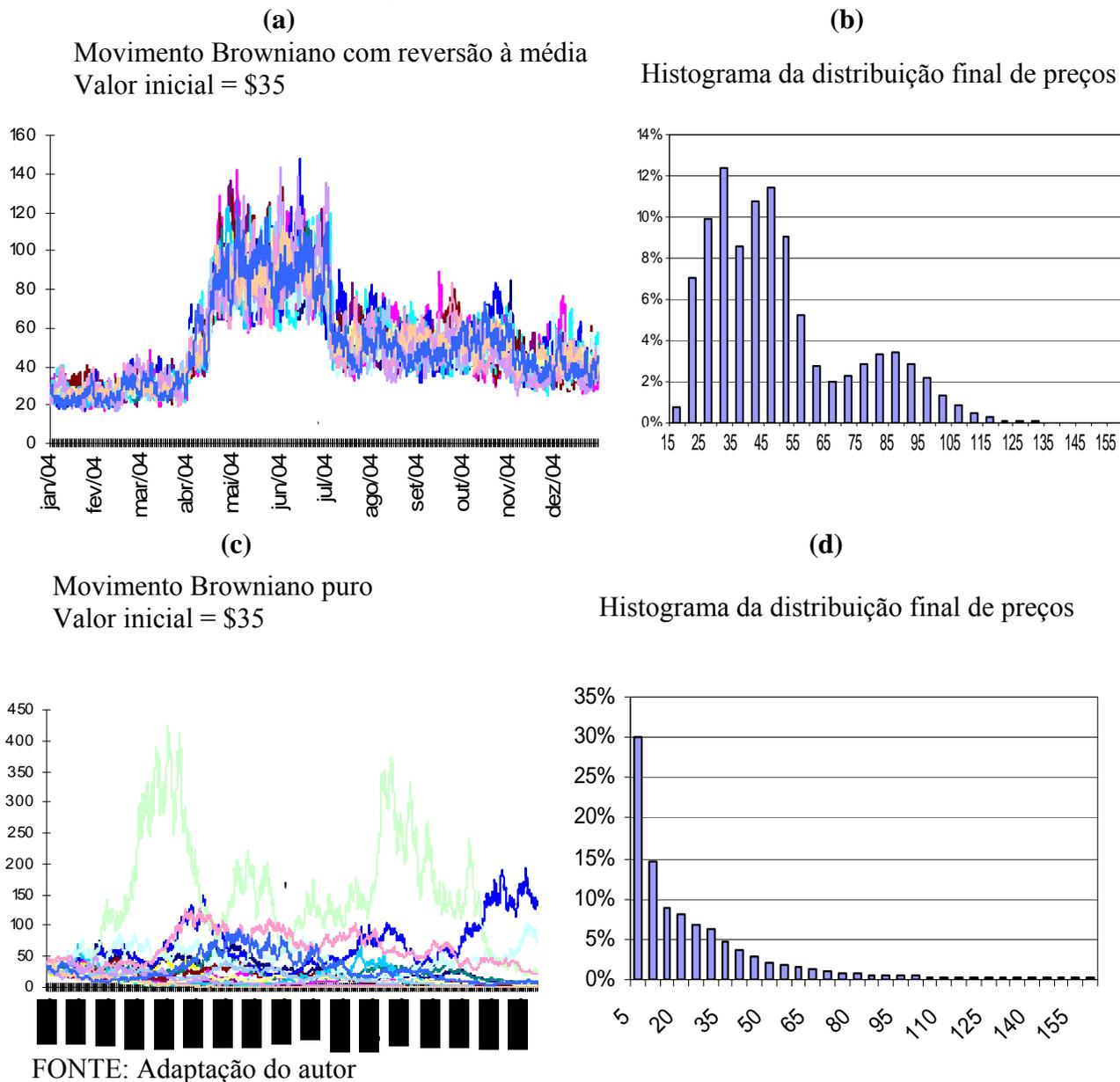
A equação 9 apresenta a evolução dos preços baseada no movimento browniano com reversão à média, onde o preço a vista no instante $t+1$ é função do preço a vista no período anterior t , da componente de reversão à média e de uma componente aleatória de difusão.

Observa-se na equação que a componente de reversão à média é função da distância entre o preço a vista (S_t) e o nível de reversão à média (s^*) multiplicado pela velocidade de reversão à média (α). Se o preço a vista esta abaixo do nível de reversão à média, a componente de reversão será positiva, resultando em uma influência crescente no preço a vista. Em contrapartida, se o preço a vista esta acima do nível de reversão à média, a componente de reversão será negativa, desta forma exercendo uma influência decrescente no preço a vista. Ao longo do tempo este movimento resulta no deslocamento do preço em direção ao preço de equilíbrio de longo prazo, a uma velocidade determinada pela razão de reversão à média.

O gráfico 5 ilustra vários caminhos simulados de preços assumindo MB versus MB com reversão à média. Repare que os dois processos partem do mesmo valor inicial de \$35, porém o processo de MB puro produz preços que podem alcançar níveis irreais no mercado de energia elétrica para longos períodos de tempo, diferentemente o processo de precificação MB com reversão à média permite com que os preços girem em torno do nível de reversão à média de equilíbrio de longo prazo, como também acompanhar a sazonalidade dos preços. Este retorno é conseguido principalmente devido à introdução do nível de reversão à média (série completa de preços para o intervalo em estudo) e velocidade de reversão à média.

Gráfico 5: a) Caminhos aleatórios do movimento browniano com reversão à média simulados em planilha excel para intervalos de 6 horas durante um ano. Parâmetros utilizados $\alpha = 10\%$; $\sigma = 12\%$ (valores médios encontrados no mercado australiano). A curva de reversão à média utilizada (S^*) é visualizada através do contorno das curvas simuladas. B) Histograma com as probabilidades de preço obtido para a simulação das 20 curvas obtidas do item a. c) Caminhos aleatórios do movimento browniano puro simulados em planilha excel para intervalos de 6 horas durante um ano. Parâmetros utilizados $\alpha = 0$; $\sigma = 12\%$.

GRÁFICO 5 – Comparativo da simulação utilizando o movimento browniano com reversão à média e o movimento browniano puro



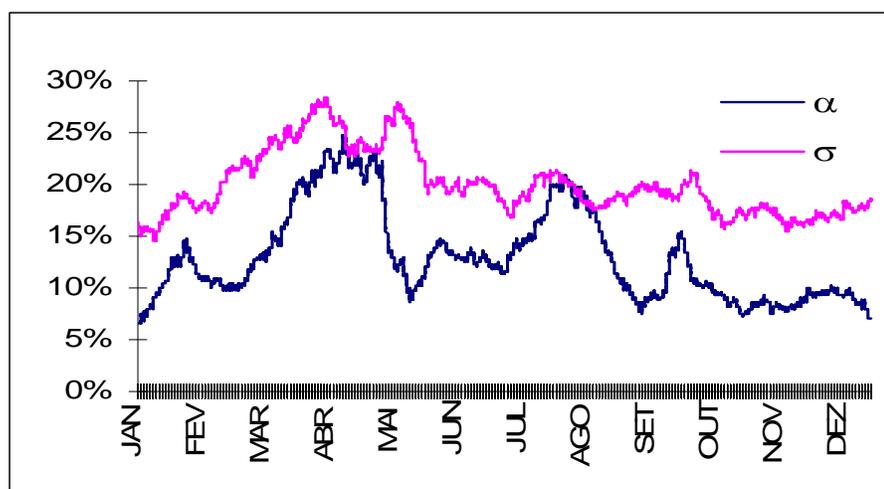
2.2.1 - Nível de reversão à média e razão de reversão à média

Uma das maiores vantagens dos modelos baseados no MB puro é a facilidade de estimar os parâmetros de simulação, onde o parâmetro mais difícil de estimar é a volatilidade (variação futura esperada para os preços ao longo do tempo). Este é geralmente estimado utilizando a

volatilidade histórica ou volatilidades estimadas. Em contrapartida, modelos de reversão à média requerem a estimação de parâmetros adicionais desconhecidos, tais como o nível de reversão à média (preço de equilíbrio de longo prazo) e a razão de reversão à média (velocidade com que os preços reverterem para o preço de equilíbrio de longo prazo).

Dependendo da formulação exata do modelo de reversão à média, estes parâmetros podem ser freqüentemente extraídos dos preços correntes, preços futuros ou das series históricas de preços. Esta aproximação tem a vantagem de incorporar sazonalidade no processo de precificação, pois a estrutura desta distribuição de preços usualmente tem características sazonais embutidas.

GRÁFICO 6 – Velocidade de reversão à média X Volatilidade



FONTE: Adaptação do autor

O Gráfico 6 apresenta as curvas de volatilidade e de velocidade de reversão à média com seus respectivos valores variando ao longo do ano. Curvas obtidas a partir dos dados do mercado australiano NSW no ano 2000. No capítulo 6 será apresentado como a estes parâmetro são calculados e extraídos em planilha excel.

Conforme Blanco (2004), no processo de reversão à média a velocidade de reversão depende de vários fatores; O commodities que está sendo analisado, a previsão de despacho associada com o commodities, etc. Neste processo a volatilidade tem um efeito limitado nos preços, pois a mesma não cresce proporcionalmente com o tempo devido ao fato de que depois de um choque os preços reverterem rapidamente para seus níveis de longo prazo. Uma outra

característica deste processo é que em mercados onde a razão de reversão à média é consideravelmente baixa, verifica-se que a volatilidade para contratos de longo prazo é menor do que a volatilidade para contratos de curto prazo

2.2.2 – Vantagens do modelo MB com reversão à média

Consideremos um derivativo de eletricidade que está no mercado e que se torna sem valor se o preço da energia elétrica subir além de \$35/MWh em um período durante a validade da opção. Utilizando o processo MB para modelar os preços da eletricidade produz-se uma distribuição de preços que resulta em uma probabilidade mais elevada de se atingir o nível de barreira durante a validade da opção, do que se utilizássemos o processo de reversão à média. Modelos de precificação de opção que utilizam o processo de reversão à média, garantem que os preços girem em torno do preço de equilíbrio de longo prazo, determinando, dessa forma, uma menor probabilidade de se alcançar a “barreira” durante a validade da opção.

Os preços mais elevados produzidos pelo método MB com reversão à média e pelo MB puro podem ser observados no gráfico 5a e 5c respectivamente. Neste exemplo os dois métodos produzem resultados diferentes (devido a sazonalidade) quando os preços modelados são usados para precificar uma opção europeia. No entanto, independentemente de sazonalidade, os dois modelos produzem preços completamente diferentes para cálculo de opções de barreira. A opção de barreira no caso do MB puro seria calculada através do maior valor obtido na simulação do gráfico 5c que no caso foi de \$400, enquanto a opção de barreira obtida com a simulação para o MB com reversão à média (gráfico 5a) seria calculada a partir do valor \$140.

2.2.3 – Desvantagens do modelo MB com reversão à média

Os preços da energia elétrica divergem de certa forma da distribuição lognormal. Embora o movimento browniano com reversão à média modele adequadamente a maneira com que os preços regressem em direção ao nível de equilíbrio de longo prazo depois que um evento de elevação de preço ocorre (falta de energia, temperaturas extremas, etc.), ele falha em capturar o evento de pico propriamente dito. Esta análise se torna extremamente importante para a gestão de risco, precificação de opções de Hedge e para a avaliação de ativos tais como, plantas de geração de energia, específicas para períodos de pico, geralmente acionadas em cenários extremos de preços.

A razão de reversão à média não é constante, ou seja, a velocidade com que os preços reverterem a seus níveis de longo prazo pode depender de vários fatores tais como a natureza, a magnitude e a direção do preço de choque. Para a maioria dos mercados verifica-se que a razão mensal de reversão à média é consideravelmente diferente para cada mês do ano (Choi, 2004).

2.3 - MB com reversão à média e saltos

Os preços da energia, em particular da eletricidade, são caracterizados por abruptas e inesperadas mudanças conhecidas como saltos ou picos. Preços de pico temporários são o resultado de problemas de suprimento tais como restrições na geração e na transmissão e responsáveis por uma grande parte da variação total e mudanças nos preços à vista da energia. No mercado desregulado de energia elétrica, empresas que não estão preparadas para gerir o crescente risco de grandes saltos de preço, podem ver seus rendimentos evaporarem em questão de horas.

Baseado no descrito acima, conclui-se que é extremamente importante levar em consideração os preços de pico na modelagem de uma estrutura de gestão de risco, na precificação de derivativos, como também na avaliação de determinados ativos tais como plantas emergenciais que são acionadas em cenários de preços extremos.

2.3.1 - Comportamento do preço a vista da eletricidade

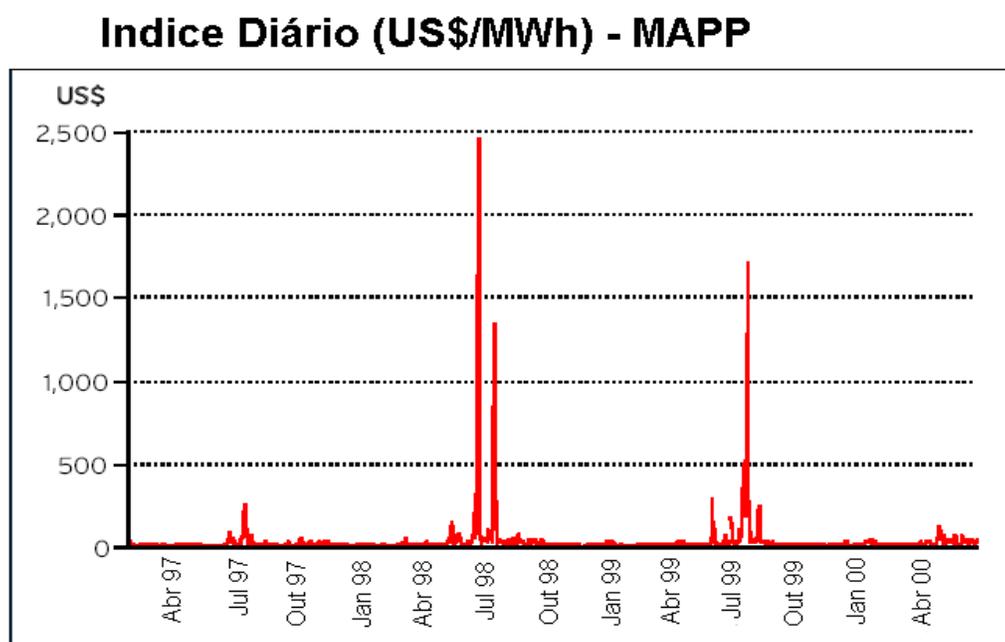
Tecnicamente o preço da energia não apenas salta, mas dá um pico, ou seja, o preço não permanece no nível alcançado pelo salto, mas rapidamente reverte para os níveis anteriores. A utilização de reversão à média juntamente com saltos nos permite simular o comportamento dos picos de preço, que são notados principalmente em períodos horários e/ou diários. Para médias semanais ou mensais, o efeito dos preços de pico são geralmente amortizados.

Johnson e Barz (1999) avaliaram a efetividade de diferentes modelos estocásticos na simulação do preço a vista (movimento browniano e reversão à média). Os modelos foram testados com e sem saltos, onde o objetivo era tentar reproduzir o comportamento do preço da energia elétrica em mercados diferenciados (Califórnia, Escandinávia, Inglaterra e Gales e Victória) para os períodos de abril-maio, agosto-setembro e novembro-dezembro. Concluiu-se que o modelo de reversão à media apresentou o melhor resultado, e que adicionando saltos para cada um dos modelos aumentou-se ainda mais o desempenho do modelo. Concluiu-se também

que os modelos sem saltos são inapropriados para a modelagem dos preços da energia, pois em simulações com estes modelos, verifica-se que alguns eventos prováveis observados, ou seja, o maior salto nos dados históricos, tem a probabilidade de ocorrência de menos de uma vez a cada 10 milhões de anos.

Pode-se perceber claramente esta característica de saltos esporádicos (intrínseca dos mercados de energia elétrica) observando os dados históricos de preços a vista nos mercados desregulados de energia; por exemplo, entre 1998 e 1999, em várias regiões dos EUA, os preços saltavam dramaticamente. O gráfico 7 mostra os preços no mercado de energia elétrica na região central dos EUA Mid-Continent Area Power Pool (MAPP), em que um dos valores observados neste mercado foi um preço de pico que chegou a \$2.500/MWh, para um volume de 50 MW. Algumas empresas não estavam bem protegidas neste momento, e as perdas financeiras chegaram a centenas de milhões de dólares em um único dia, onde algumas falências vieram a ocorrer.

GRÁFICO 7 - Curva de preços a vista do mercado Mid Continent Area Pool (MAPP) – EUA (Abr/97 a Abr/00)



Fonte FEA 2004.

2.3.2 - O Processo de difusão de saltos aplicado aos preços da energia elétrica

Para precificar derivativos de eletricidade é necessário mapear a evolução do preço da energia ao longo do tempo. Modelos gerais de difusão, que utilizam a volatilidade como uma função do tempo, são os mais empregados por participantes do mercado de energia elétrica, porém falham ao tentar capturar os momentos de pico dos preços da eletricidade.

Nos modelos com difusão de saltos, a dinâmica de variação dos preços pode ser dividida de duas formas distintas:

1. Um processo de difusão normal e contínuo dos preços modelado pelo movimento browniano com reversão à média e uma estrutura com uma componente de volatilidade, que nos permite capturar a dinâmica dos preços da eletricidade sem os saltos.
2. Um processo de saltos não normal e descontínuo, modelado por uma distribuição aleatória de picos, cuja ocorrência é geralmente resultado da falta de energia, restrição da transmissão, etc.

Segundo Blanco (2004)

o processo de difusão descrito no documento original de Merton é a melhor referência para uma descrição imparcial dos preços, através de uma suposição de valores distribuídos independentemente. Esta suposição não incorpora reversão à média e assume que os saltos podem ser positivos ou negativos. Desta forma conduzindo à elevados incrementos ou decrementos nos preços. A principal limitação do modelo de difusão de saltos de Merton (1976) quando empregado no mercado de energia elétrica é que este assume que o processo de difusão lognormal e o processo descontínuo de picos aleatórios são totalmente independentes um do outro. Este não é o caso da eletricidade. Por exemplo, é improvável que os preços da energia elétrica saltem durante a noite quando a demanda é muito baixa, por isso a natureza dos picos de preços no mercado de energia elétrica requer uma adaptação do modelo de Merton.

2.3.3 - Parâmetros do modelo MB com saltos

Conforme comentado anteriormente uma das grandes vantagens do modelo baseado no MB é a facilidade de se estimar os parâmetros de simulação, a reversão à média requer a estimativa de parâmetros mais específicos tais como nível de reversão à média e razão de reversão à média.

Conforme Blanco (2004), para possibilitar a ocorrência de um salto, com suas respectivas magnitudes e desvio padrão, introduz-se uma componente descontínua de salto em um curto

período de tempo, ao princípio do caminho aleatório com reversão à média. A equação apresentada em seu trabalho, para obtenção deste processo é expressa como:

$$S_{t+1} - S_t = \alpha (S^* - S_t)\Delta t + S_t \sigma \varepsilon_t \sqrt{\Delta t} + \eta [S_t (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})]$$

Para propósitos deste trabalho consideraremos Δt igual a 1, pois iremos simular a evolução dos preços sempre em intervalos consecutivos de tempo, sendo $\Delta t = t+1 - t = 1$, desta forma teremos a seguinte equação:

$$S_{t+1} = S_t + \underbrace{\alpha (S^* - S_t)}_{\text{Componente de reversão à média}} + \underbrace{S_t \sigma \varepsilon_{1t}}_{\text{Componente de difusão}} + \underbrace{\eta [S_t (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})]}_{\text{Componente de salto}} \quad (10)$$

Preço em t+1

Preço em t

Componente de reversão à média

Componente de difusão

Componente de salto

Onde:

S^* : Nível de reversão à média ou preço de equilíbrio de longo prazo

S_t : Preço A vista no tempo t

α : Razão de reversão à média

σ : Volatilidade do processo de difusão

ε_{1t} e ε_{2t} : Variação aleatória com valores variando entre -1 à $+1$ e média zero (vide pág 15).

η : Variável aleatória cujo valor pode assumir o valor um quando for um pico ou zero quando não for pico. A probabilidade de ocorrência do valor um ou zero depende do percentual de picos que se deseja obter em uma modelagem. Em Excel, para se obter uma determinada quantidade de picos ($\eta = 1$) utiliza-se a função $[\text{aleatório}]^n$, onde n é um valor real que determina a probabilidade de η ser zero ou um. Para isso deve-se construir uma tabela onde se associa valores de n com o percentual de $\eta = 1$ obtidos.

κ : Magnitude mínima esperada do salto. Indica a quantidade mínima de vezes que um pico é maior que o preço a vista no instante anterior. Este valor é determinado pelo analista do mercado.

Em nosso estudo utilizar-se-á o valor de $\kappa = 2$.

δ : Desvio padrão do salto. Este parâmetro somado à κ indica a quantidade máxima de vezes que um pico é maior que o preço a vista no instante anterior quando $\varepsilon_{2t} = 1$.

A equação 10 apresenta a evolução dos preços baseada no movimento browniano com reversão à média e saltos, onde o preço a vista no instante $t+1$ é função do preço a vista no período anterior t , da componente de reversão à média, de uma componente aleatória de difusão e de uma componente de saltos.

O processo de difusão de saltos introduz novos parâmetros no modelo que permitem modelar os eventos de ruptura abrupta nos preços da energia elétrica. Para estes novos parâmetros necessita-se determinar a probabilidade de ocorrência ou a frequência dos saltos, sua amplitude, bem como a variabilidade esperada ou desvio padrão.

- a) Frequência do salto: Determina a frequência média com que os saltos ocorrem e medida como a quantidade de saltos ou percentual de ocorrência por mês.
- b) Retorno médio e desvio padrão: A amplitude média do salto κ , descreve a variação mínima do preço (com relação ao preço no instante anterior) de um período para outro depois que um evento de salto ocorre, enquanto δ (desvio padrão) descreve a dispersão do retorno do salto acima de seu valor base.

O desvio padrão dos saltos é um número maior ou igual a zero, que determina a volatilidade da amplitude dos saltos em uma distribuição de probabilidade. Por exemplo, uma amplitude esperada de salto de 200% e desvio padrão de 50%, indica que, em média, o preço em questão duplicará depois de um salto, porém com possibilidade de atingir valores até 250% do nível de reversão à média.

O processo de reversão à média com difusão de saltos permite que os preços retornem rapidamente para os níveis de pré-salto. Caso a reversão à média não fosse incluída no modelo, os preços previstos poderiam ficar no nível mais elevado indefinidamente depois que os saltos ocorressem, gerando valores discrepantes com a realidade do mercado.

De acordo com Soronow (2004)

para estimar os parâmetros do salto no modelo, precisa-se primeiro especificar um limite e utilizá-lo para filtrar os eventos de salto. Por exemplo, dependendo da quantidade de dados que está sendo utilizada, pode-se definir que os preços que retornarem iguais ou

maiores que 2 vezes o nível de reversão à média deverão ser considerados como eventos de salto. Uma vez que o evento de salto está identificado, sua frequência (quantidade) pode ser extraída através de uma simples contagem, e os parâmetros de distribuição que descrevem a amplitude do salto podem também ser obtidos. Os saltos podem agora ser verificados explicitamente e, se necessário, a volatilidade da parte difusa pode ser reestimada retirando-se os preços de pico, de forma que os saltos não distorçam o valor base da volatilidade.

2.3.4 - Desvantagens do modelo MB com reversão à média e difusão de picos.

a) Calibração do modelo de difusão de saltos com dados históricos

Dados históricos são sempre referências pobres no mercado de energia elétrica. Um dos pontos fracos da tentativa de se estimar parâmetros de um modelo baseado em dados passados é que estes dados não incorporam expectativas sobre saltos futuros. O mercado fornece a possibilidade de calibrar os modelos com os preços reais, porém quando tem-se múltiplos parâmetros para estimar, precisa-se fazer certas suposições sobre o valor destes parâmetros.

Pode-se também utilizar preços futuros como um referencial do nível e frequência dos saltos esperados para o futuro. Por exemplo, quando os preços futuros da eletricidade experimentam um súbito crescimento para despachos no verão na região centro-oeste dos EUA, é provável que uma grande parte deste aumento possa ser atribuída às expectativas sobre magnitude e frequência dos preços de pico ao invés de um aumento geral no nível de preço esperado.

Afim de precificar derivativos de forma mais precisa com um modelo de difusão de saltos, deve-se tentar combinar dados históricos com estimativas futuras dos parâmetros dos saltos que leve em consideração as condições atuais do mercado e que influenciem na probabilidade de ocorrência dos picos (falta de capacidade de geração/transmissão, previsão do tempo, etc).

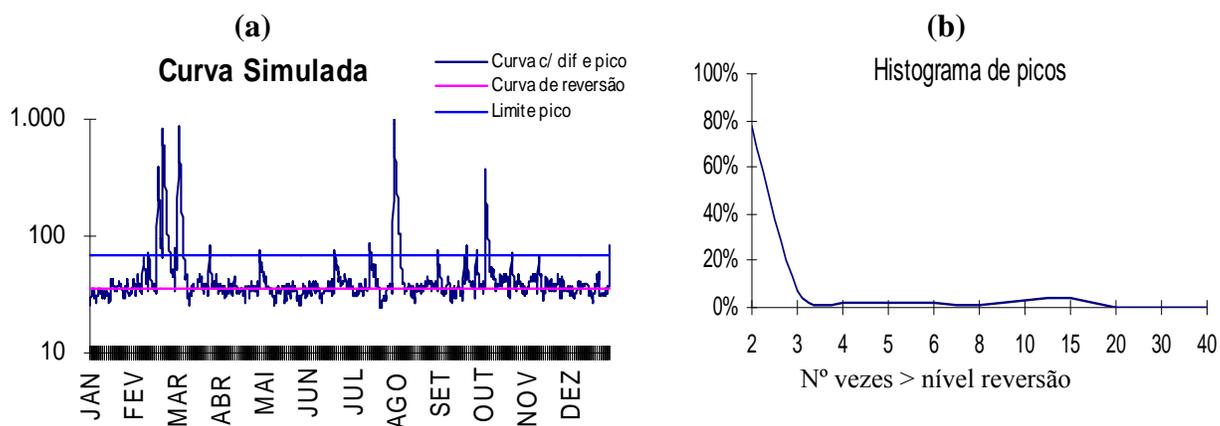
b) Os Parâmetros de salto não são constantes

A amplitude, frequência, volatilidade e a velocidade com que os saltos revertem para seus níveis de longo prazo dependem de vários fatores tais como a natureza, magnitude, duração do evento que causou o choque de preço e a sazonalidade do mercado. Se, por exemplo, calibrássemos a amplitude, a frequência e o desvio padrão dos saltos em uma simulação utilizando dados exclusivos de um único mês, descobrir-se-ia que, para a maioria dos mercados, os resultados da simulação seriam inconsistentes com a realidade de cada mercado.

c) A razão de reversão à média pode ser diferente para os saltos quando comparados com a razão de reversão para variações de preço sem salto

Quando o preço da eletricidade salta para um valor de pico, ele tende a voltar para seus níveis de longo prazo muito mais rápido do que se ele tivesse variações menores. O processo de difusão de saltos apresentado supõe que existe apenas uma velocidade de reversão à média, porém processos mais complexos supõem que a reversão à média é diferente dependendo da magnitude do choque e do período do ano. A causa do choque também pode ter um efeito, por exemplo, se o salto for resultado da falha de uma linha de transmissão, os preços podem reverter para à média imediatamente tão logo o problema na linha de transmissão seja corrigido, por outro lado se os preços se elevam devido às condições adversas do tempo, os saltos podem ocorrer quando de um pico de consumo, então a velocidade de retorno para a normalidade dependerá das variações das condições do tempo.

GRÁFICO 8 – Modelagem da curva de preço com reversão à média e Saltos



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 8a apresenta uma curva de preço modelada pelo movimento browniano com reversão à média e saltos, simulada em planilha excel para intervalos de 6 horas para um período de um ano. Parâmetros utilizados $\alpha = 16\%$; $\sigma = 17\%$; $\delta = 20$; η = calibrado para retornar 1% de valores de pico, $\kappa = 2$, ε_{1t} e ε_{2t} : valores aleatórios entre -1 e 1 , onde a curva de ajuste é normal. A curva de reversão à média foi considerada como uma constante igual a \$35. Gráfico 8b é o histograma de picos desejado para a simulação.

Utilizando-se diretamente a fórmula apresentada anteriormente por Blanco para a simulação dos picos, percebe-se pelo gráfico 8 que o resultado obtido é diferente da calibração efetuada, pois claramente verifica-se a existência de vários picos com amplitude acima da expectativa do histograma pretendido, como também uma elevação na quantidade total de picos. Isto se dá devido a não diferenciação entre o que é pico e o que são valores de reversão à média, desta forma o fator de reversão à média α e o fator de difusão σ são aplicados igualmente em todos os valores da amostra simulada, fazendo com que os picos se difundam ao longo da curva de acordo com a velocidade de reversão à média α e a difusão σ .

Na fórmula também é aplicado um fator multiplicador K em cima do valor a vista S_t para se obter o preço de pico, originando um incremento em cima deste valor, quando na verdade o incremento deveria ser em cima de S^* , pois estamos admitindo que o valor é considerado como pico quando atingir ou ultrapassar em duas vezes o nível de reversão à média e não o nível atual de preço. Utilizando-se a fórmula da maneira que está, existe também a probabilidade de calcularmos o valor de pico em cima de um outro valor de pico anterior (S_t e S_{t+1}) fazendo com que o tamanho de alguns picos sejam maiores do que o esperado na simulação, além disso os picos são colocados na fórmula como uma adição, ou seja, estamos somando o valor de pico desejado à um valor já existente de S_t , fazendo com que todos os valores simulados de pico fiquem acima da calibração efetuada.

Para solucionar estes problemas, devemos buscar um modelo que trate estes dois comportamentos dos preços da energia elétrica de forma separada.

2.4 – Alternância entre regimes (Regime Switching)

Observando-se as variações dos preços do mercado australiano, pode-se perceber que os saltos nos preços da energia elétrica possuem um nível de reversão à média que é independente do regime normal de reversão à média, por isso devem ser considerados de forma separada para que os parâmetros de calibração de um regime não influencie na evolução do outro regime. Baseado nesta percepção deve-se buscar um modelo que leve em consideração dois regimes distintos: um regime de reversão à média e outro regime de picos.

Segundo Huisman (2001), os parâmetros utilizados no modelo de reversão à média geralmente conduz uma simulação à volatilidades super elevadas e irreais quando picos de preço

a vista são considerados conjuntamente, como também converge a simulação para altos valores de preço médio.

Jong (2002) acrescenta que os modelos com saltos permitem gerar picos de preços aleatórios e de amplitudes extremas, porém não incorporam uma importante característica da eletricidade: Preços de pico possuem uma duração relativamente curta, ou seja, o modelo não leva em consideração que após um pico os preços simplesmente retornam a seus níveis normais muito rapidamente. Isso só seria possível através de uma velocidade de reversão à média irreal que forçaria os preços de pico de volta para os níveis normais logo após o evento causador do salto ter ocorrido.

A partir destas afirmativas e da observação das variações dos preços a vista no mercado australiano, conclui-se que a introdução de picos no modelo de reversão à média não deve ser efetuada simplesmente através da adição dos picos aos valores de reversão à média, ao invés disso deve-se utilizar um modelo que permita a alternância entre os diferentes regimes existentes, regime de reversão à média e regime de saltos.

Para Huisman (2002), o modelo de alternância de regimes tem a capacidade de resolver alguns destes problemas, à medida que permite distintos comportamentos em diferentes intervalos de forma independente.

Verifica-se que este modelo possui as mesmas características que o MB com reversão à média e saltos, com a única particularidade de estarem separados em dois regimes.

Baseado nestas informações pode-se reescrever a equação para o cálculo do preço a vista futuro da seguinte forma:

$$S_{t+1}(\text{total}) = S_{t+1}(\text{reversão}) \text{ ou } S_{t+1}(\text{pico})$$

Onde a probabilidade de ocorrência de um regime ou do outro, depende da probabilidade dos picos ocorrerem em um determinado período.

A equação para o regime de reversão à média é exatamente a equação (9) do modelo de reversão à média, que pode ser reescrita como:

$$\underbrace{S_{t+1}(\text{reversão})}_{\text{Preço em } t+1} = \underbrace{S_t(\text{reversão})}_{\text{Preço em } t} + \underbrace{\alpha_r(S^* - S_t(\text{reversão}))}_{\text{Componente de reversão à média}} + \underbrace{S_t(\text{reversão}) \sigma_r \epsilon_{1t}}_{\text{Componente de difusão}} \quad (11)$$

Onde: **St (reversão)**: Preço A vista no instante t para o regime de reversão

α_r : Velocidade de reversão à média para o regime de reversão

σ_r : Volatilidade para o regime de reversão

A equação para o regime de pico pode ser adaptada da componente de salto da equação (9) com a introdução de uma componente de reversão de pico da seguinte forma:

$$\underbrace{S_{t+1(\text{pico})}}_{\text{Preço em t+1}} = \underbrace{S_{t(\text{pico})}}_{\text{Preço em t}} + \underbrace{\alpha_p(- S_{t(\text{pico})})}_{\text{Componente de reversão de pico}} + \underbrace{\eta[S^*(\kappa + \delta\epsilon_{2t})]}_{\text{Componente de salto}} \quad (12)$$

Sendo que **St(pico)**: Preço A vista no instante t para o regime de pico

α_p : Velocidade de reversão de pico para o regime de pico

Para que pudéssemos regredir os valores de pico à velocidades maiores que a velocidade de reversão à média, foi considerado um processo exclusivo de reversão de pico para o regime de saltos, de forma que a reversão dos picos possa ter uma velocidade diferenciada da do regime de reversão à média e poder modelar de forma mais realista o retorno dos saltos. A componente de salto também foi modificada, substituindo-se o valor S_t (preço a vista) por S^* (preço dentro da curva de reversão), conforme explicado no item 3.3.4 c. Conforme pode-se observar da equação (12), o pico $S_{t+1(\text{pico})}$, tende a regredir para um valor igual a zero ao longo do tempo. Para confirmar esta afirmativa suponha que $\alpha_p = 1$ e η seja calibrado para retornar 1% de picos, suponhamos também que $S_t(\text{pico})$ seja igual a zero devido a não ocorrência de pico no período anterior. O valor de $S_{t+1(\text{pico})}$ será então puramente a componente de salto. No instante seguinte, suponha que a componente de salto seja igual a zero (probabilidade de 99%), com isso temos que o valor do regime de pico é igual a zero, pois o valor do pico anterior é subtraído do próprio valor de pico $S_t(\text{pico}) + \alpha_p(- S_t(\text{pico}))$. No entanto, antes que este valor se torne zero, o regime de reversão à média deve voltar a “assumir” a posição de regime vigente. Para isso foi determinado um limite em que o regime de pico deixa de atuar de forma automática. Este limite foi definido como sendo o nível máximo do valor de reversão à média em um intervalo de um mês, ou seja, quando o nível de pico ficar abaixo deste limite, o regime de reversão à média assume o “comando”.

CAPÍTULO 3

3 – Contratos derivativos

3.1 - Contratos a Termo

Um contrato a termo especifica a entrega de um determinado ativo a um preço acordado, local pré-estabelecido e momento específico no futuro. O preço do contrato só é pago no ato da entrega, quando o ativo é recebido, não havendo pagamento inicial. A diferença entre o valor do mercado do ativo e o preço contratado na data da entrega representa um lucro ou um prejuízo para o portador do contrato. Por exemplo, se o contrato a termo tem um preço de \$100, mas o valor do ativo no mercado a vista subir para \$110 na data da entrega, o portador do contrato obtém um lucro de \$10, já que pode receber o ativo e revendê-lo imediatamente. O emissor do contrato, que deve entregar o ativo, sofre uma perda de igual valor. O contrato a termo irá favorecer o gerador sempre que o preço a vista for menor que o preço do contrato acordado, e no caso oposto irá proteger a carga sempre que o preço a vista ultrapassar o preço do contrato.

3.2 - Contratos Futuros

Um contrato futuro é semelhante a um contrato a termo, pois especifica um preço e uma data futura para a entrega do ativo. Apresenta, no entanto, algumas particularidades que facilitam sua negociação no mercado:

- São altamente padronizados e comercializados num mercado de futuros: cada contrato de futuro é emitido por uma bolsa de mercadorias ou financeira específica. O contrato geralmente exige que compradores e vendedores façam um depósito, ou tenham uma margem de segurança padrão, na bolsa, para se garantir contra inadimplência. Para ativos financeiros o local da entrega é geralmente a própria bolsa. Apenas o preço do contrato é negociável.
- Qualquer mudança no valor do contrato são liquidadas diariamente neste mercado
- Em geral não envolvem entrega física do ativo: Geralmente os portadores de contratos de futuros os vendem imediatamente antes de seu vencimento, e os emissores os recomparam para contrabalançar suas obrigações. Estas transações ocorrem no valor a vista do ativo e eliminam os custos da entrega do ativo contratado à bolsa. De maneira análoga ao

contrato a termo, o lucro do contrato é a diferença entre o preço pago pelo mesmo e o valor de mercado do ativo no vencimento.

3.3 - Relação entre Preço Futuro e Preço a vista

Como visto anteriormente o preço a vista representa o preço de um ativo na data de entrega. Preços futuros, por outro lado, são os preços estabelecidos hoje para entrega futura. À medida que a data de vencimento se aproxima a cotação do mercado futuro tende para a do mercado a vista, mas uma vez que o preço futuro estabelecido hoje pode diferir do preço a vista vigente na data da entrega, não é fácil atribuir um valor ao contrato a termo.

Muitos “commodities” de energia – eletricidade em particular – não podem ser prontamente armazenadas a baixo custo. Como resultado, os preços futuros podem divergir drasticamente do preço a vista corrente. A comparação mais interessante para “commodities” de energia se faz entre os preços futuros e o valor esperado dos preços a vista para a mesma data de entrega. Esta é uma comparação mais difícil, porque as expectativas sobre o preço a vista não são observáveis. Há, no entanto, vários métodos indiretos que nos permitem inferir seu status relativo. O método mais óbvio é analisar a relação existente entre os preços dos futuros e os preços a vista reais correspondentes na data da entrega. Se o preço futuro fosse igual ao preço a vista esperado, esta proporção, ou índice, estaria próxima a um. Fez-se esta comparação para sete “commodities” de energia que tinham histórico de sete ou mais anos de preços de contratos de futuros.

De todo modo, o índice médio entre os preços a vista na entrega (estimado pelo preço de fechamento do contrato no último dia de negociação) e os preços futuros para o mesmo contrato seis meses antes da entrega foi consistentemente maior que um. Isto sugere que os preços futuros estão abaixo dos preços a vista esperados para uma mesma data de entrega.

Esta conclusão não é intuitiva para aqueles que argumentam que os compradores de energia estariam dispostos a pagar um prêmio pela segurança de preço. Diante deste argumento, os preços futuros deveriam ser mais altos do que os preços a vista esperados, porque os preços futuros são o que fornece esta segurança de preço. Esta hipótese pode ser verdadeira – pode ser que os compradores estejam mesmo dispostos a pagar um prêmio – mas a conclusão não vem naturalmente. Poderíamos contrapor o argumento de que os vendedores, que na maioria dos casos

têm dívidas significativas a honrar, têm uma necessidade ainda maior de segurança de preço, algo que lhes proporcione um fluxo de caixa estável. Esta hipótese se baseia no fato de que os vendedores estariam dispostos a aceitar vender o futuro a um preço menor que o preço a vista esperado para garantir este fluxo de caixa. Esta posição também pode ser verdadeira, mas não conclusiva. O que os compradores podem estar dispostos a pagar e o que os vendedores podem estar dispostos a aceitar não determina o preço futuro. Estas preferências meramente marcam fronteiras dentro de uma faixa aceitável de preços futuros.

3.4 – Contrato de Opção

Contratos a termo e de futuros são acordos para entregar uma quantidade fixa em dia e lugar definidos. Contudo, muitos negociantes preferem reter um certo grau de flexibilidade com relação a entrega futura. Os contratos de opção permitem a um negociante decidir se determinado produto deve ser entregue numa data posterior.

3.4.1 - Opções de Compra

A opção de compra dá ao portador o direito de adquirir determinado ativo por um preço de exercício específico, em data futura. Diferentemente de um contrato a termo ou de futuros, o contrato de opção não obriga seu portador a comprar o ativo. O preço de um contrato de opção compõe-se de dois elementos:

1. Preço de exercício - preço pago quando a opção é exercida, isto é, quando o comprador exerce seu direito assegurado pelo contrato. Este pode ser muito diferente do preço do mercado a vista da mercadoria, que prevalecerá quando o contrato for exercido;
2. Prêmio é a quantia paga pelo contratante (comprador) por um contrato de opção e recebido pelo lançador (vendedor). Reflete duas diferenças – entre o preço básico de exercício e o preço a vista futuro esperado: o “valor intrínseco” e o “valor temporal”. O valor intrínseco é a diferença entre o preço de exercício e o preço atual do ativo no mercado a vista; o “valor temporal” reflete a diferença entre o preço atual no mercado a vista e o preço esperado no mercado a vista quando o contrato for exercido.

O período no qual se pode exercer a opção pode ser definido de diversas maneiras. Se for europeia, a opção de compra só poderá ser exercida num determinado dia (por ex, o último dia

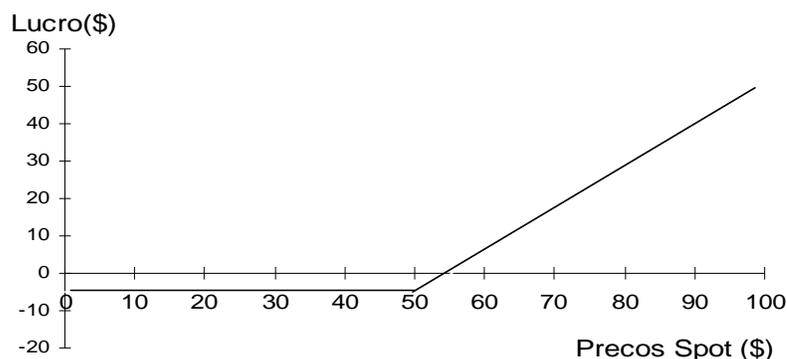
útil de agosto); se for americana, a opção de compra poderá ser exercida a qualquer momento até aquele dia.

O exemplo seguinte ilustra como poderia funcionar uma opção de compra. Suponhamos que esteja para vencer uma opção de compra com um preço de exercício de \$50. Se o preço do ativo estiver, digamos, no nível de \$40, onde se espera que permaneça, ninguém irá querer pagar o preço de exercício de \$50 para adquirir o ativo através da opção de compra. Esta opção, portanto, não terá valor. Se, por outro lado, o preço do ativo no mercado a vista for, digamos, \$60, valerá a pena exercer a opção para adquirir o ativo. A opção vale \$10, isto é, a diferença entre o preço a vista de \$60 e os \$50 a serem pagos para comprar o ativo pelo contrato.

Se o preço de mercado de um ativo ultrapassa o preço de exercício, diz-se que a opção de compra está dentro do valor de exercício e o dono da opção de compra irá exercê-la, a fim de ganhar a diferença entre os dois preços (o valor do exercício). Se, no entanto, o preço de mercado de um ativo estiver abaixo do preço de exercício, a opção de compra estará fora do valor de exercício e não será exercida. Quando o preço de mercado é exatamente igual ao preço de exercício, diz-se que a opção de compra está no dinheiro. Neste caso, não fará diferença exercê-la ou não.

O gráfico 9 apresenta o lucro associado a uma opção de compra com preço de exercício de \$50 como função do preço do ativo no mercado a vista, levando consideração seu prêmio, \$5 por exemplo. Novamente, se o preço no mercado a vista for de \$70 o investidor exerce a opção, comprando o ativo por \$50. Neste caso ele tem um lucro de \$20 menos o valor do prêmio da opção o que resulta em lucro final de \$15. Se por outro lado o preço a vista é \$20 a opção não é exercida e o prejuízo se resume no valor do prêmio da opção - \$5.

GRÁFICO 9 – Prêmio e Lucro de uma Opção de Compra



FONTE: Adaptação do autor

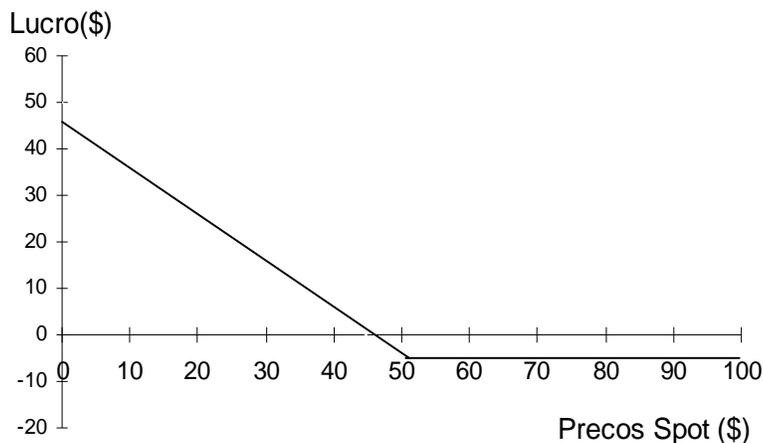
3.4.2 - Opções de Venda

O dono de uma opção de venda tem o direito de vender o respectivo ativo por um preço de exercício determinado a qualquer momento; se paga determinado preço ou prêmio por esse direito, tal como na opção de compra.

Outro exemplo talvez possa ilustrar o funcionamento de uma opção de venda. Suponhamos que uma opção de venda dê ao proprietário o direito de vender um ativo por \$50. As circunstâncias que tornam a opção de venda valiosa são inversas às que tornam a opção de compra valiosa: se o preço a vista do ativo for superior a \$50 imediatamente antes do vencimento, ninguém querará vender o ativo pelo preço de exercício, o que torna a opção de venda sem valor. Se o preço do ativo for inferior a \$50, valerá a pena produzi-lo (ou mesmo comprá-lo no mercado a vista) e aproveitar a opção para vendê-lo a \$50. O valor de uma opção de venda no vencimento é a diferença entre os \$50 obtidos na venda e o preço de mercado do ativo.

O gráfico 10 mostra o lucro associado a uma opção de venda com preço de exercício de \$50 como função do preço do ativo no mercado a vista, levando consideração seu prêmio, \$5 por exemplo. Novamente, se o preço no mercado a vista for de \$70 o investidor não exerce a opção e o prejuízo se resume no valor do prêmio da opção. Se o preço no a vista for \$20 o investidor exerce a opção e vende o ativo por \$50. Neste caso ele tem um lucro de \$30 menos o valor do prêmio da opção o que resulta em lucro final de \$25.

GRÁFICO 10 – Prêmio e Lucro de uma Opção de Venda



FONTE: Adaptação do autor

3.4.3 - Combinações de Opções

Pode-se combinar opções de compra e de venda para limitar qualquer risco. Por exemplo, suponhamos que um investidor venda uma opção de compra por \$105, mas se preocupa com a possibilidade de o preço a vista elevar-se muito. Neste caso, o risco será ter que pagar um preço alto para cumprir o contrato. O investidor poderá limitar esse risco comprando outra opção de compra por \$110. Assim, ele nunca terá que pagar mais de \$110 para cumprir a primeira opção de compra. A combinação de compra e venda pelo mesmo preço de exercício é chamada de opção casada e equivale a um contrato a preço fixo.

Esses tipos de contrato são muito comuns no setor elétrico do Reino Unido, onde o objetivo é replicar o contrato de compra de energia a preço fixo. Quando o preço a vista fica acima do preço de exercício, o investidor exerce a opção de compra; quando o preço a vista cai abaixo do preço de exercício, o vendedor exerce a opção de venda; o contrato será, portanto, exercido em qualquer circunstância, como um contrato a termo. Algumas combinações de contratos de opção são bastante conhecidas como instrumentos de limitação de risco¹.

¹ Este capítulo foi baseado na apostila de análise de gestão e mitigação de riscos de Sergio Granville 2003.

CAPÍTULO 4

4 – Precificação de Opções em Mercados de Energia Elétrica

Desde o começo da década de 90 os mercados de energia elétrica vêm sendo reformados em todo o mundo, passando de uma concepção estatal, controlada pelo governo e verticalmente integralizada, para mercados privados competitivos. Antes da desregulamentação, as autoridades governamentais fixavam os preços de base como o custo marginal de produção de uma maneira bastante previsível. Agora que muitos mercados estão se tornando desregulados, os participantes têm que se acostumar com um ambiente com alta volatilidade de preços e elevadas incertezas.

Segundo Granville (2003), a grande dificuldade na precificação destes derivativos é a não economicidade da armazenagem da energia elétrica. Isto porque uma premissa básica dos modelos tradicionais de precificação é que pode-se construir um portfólio livre de risco baseado na venda da opção e compra/estocagem de uma quantidade Δ do ativo objeto, no caso a energia elétrica.

Os preços da eletricidade são conhecidamente muito voláteis e sujeitos a freqüentes saltos devido a interrupções no sistema de transmissão e/ou geração, excesso de demanda, e suprimento inelástico. Um portfólio apropriado de precificação e modelos de gerenciamento de risco devem ser incorporados para melhor analisar estes preços de pico.

Conforme Jong (2002), para a avaliação de derivativos de eletricidade não se pode simplesmente utilizar os modelos financeiros corriqueiros e outros contratos de commodities. A Eletricidade é um commodities de fluxo, com limitada capacidade de armazenamento e transporte e que afeta fortemente o comportamento do preço a vista da energia elétrica e os preços de seus derivativos. Devido aos sérios obstáculos para transportar a eletricidade de um lugar para outro como também para transportá-la de um período para outro, fica difícil a arbitragem. Esta falta de flexibilidade leva o preço a vista à uma grande dependência de suprimento local e temporal e das condições de demanda. Se a demanda e a oferta respondessem imediatamente aos movimentos de preço, estes não iriam se desviar muito do preço de outras commodities, no entanto a elasticidade tanto da demanda quanto da oferta são relativamente limitadas.

Para Huisman (2001) estas características particulares da eletricidade levaram ao desenvolvimento de modelos especiais para precificação da energia elétrica. Tais modelos são a

base para aplicações de gestão de risco, para a precificação de contratos físicos e financeiros e para a avaliação de ativos. Os modelos utilizados são geralmente mais complexos, e possuem a habilidade de capturar sazonalidade, reversão à média, alta volatilidade e os preços de pico ao mesmo tempo. Utilizar um modelo de difusão é fundamentalmente importante quando se avalia opções de compra muito fora do valor de exercício. Estas opções podem ser encontradas em muitos tipos de contratos de eletricidade, como por exemplo, contratos futuros que contém cláusulas de cumprimento obrigatório. Mesmo que estas cláusulas se efetivem somente em altos preços da eletricidade, é necessário modelar os saltos de preço diretamente, afim de precificar a opção e proteger seu comprador de forma efetiva.

Conforme Blanco (2004)

a utilização de um processo de difusão puro (sem saltos) para precificar certos derivativos de eletricidade seria na melhor das hipóteses questionável e no pior caso totalmente não confiável para precificação de opções. Enquanto o prêmio teórico para opções fora do valor de exercício pode ser desprezível, quando calculado com modelos tradicionais de avaliação sem saltos, o mercado pode estar indicando um valor muito diferente e, obviamente, mais real para estas opções. Afim de precificar apropriadamente as opções de eletricidade, precisa-se utilizar modelos que possibilitem a ocorrência de saltos com uma amplitude considerável, e que permita conduzir a opção à um valor em que o preço do ativo de referência fique acima do preço de exercício.

Modelar preços de pico de forma precisa também é importante para os ativos de geração, principalmente para plantas emergenciais com altos custos operacionais, cujo valor é quase que totalmente dependente da existência de preços de pico que as permitiriam recuperar os altos custos marginais, como também recuperar seus custos fixos em um período de funcionamento muito curto.

4.1 - Cenários extremos de preço

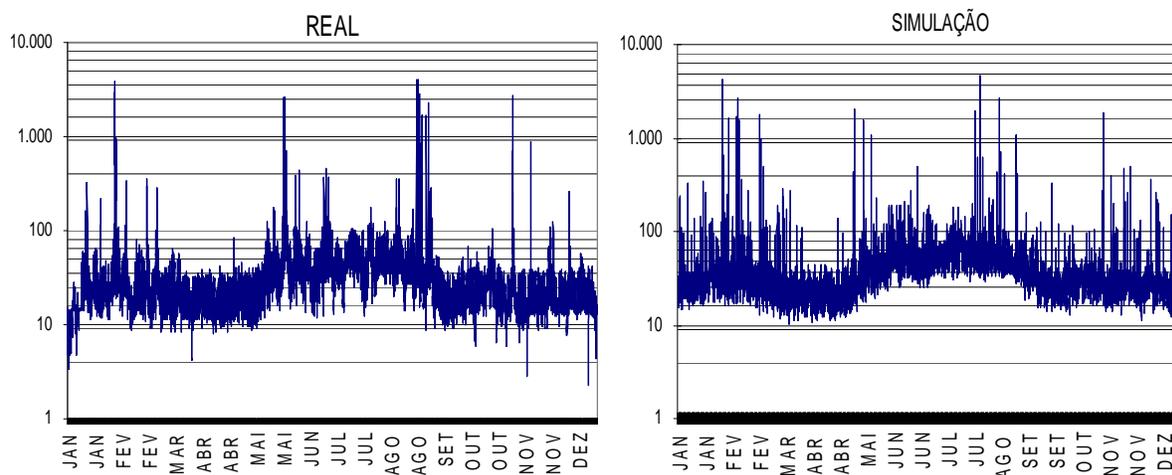
Como estamos lidando com mercados onde os preços podem experimentar súbitos picos, é necessário incorporar a possibilidade de ocorrência de tais eventos na estrutura de modelagem. Utilizando-se um processo de difusão de saltos em uma simulação de risco, pode-se incorporar eventos extremos e, dependendo das condições de mercado esperadas, pode-se ajustar os parâmetros dos salto antes de se conduzir à simulação. Simulações com utilização de valores históricos podem também ser úteis em lidar com os saltos, no entanto devido ao forte efeito de reversão à média, deve-se cuidadosamente pré-processar os dados antes de se conduzir a uma análise, pois a existência de saltos com rápida reversão à media pode desviar a distribuição que é

utilizada para direcionar a análise, como também deve-se tomar cuidado com uma análise puramente histórica, pois os saltos futuros não necessariamente se comportarão como os saltos históricos. Alterações físicas do setor elétrico, tais como redimensionamento de uma linha de transmissão, construção de novas geradoras, ou até mesmo diferentes condições climáticas, podem remover as situações que levaram à ocorrência do salto.(CHOI, 2004).

Se os ganhos das empresas também dependem da geração disponível, atenção especial deve ser dada para a identificação e qualificação dos riscos operacionais tais como falta de energia, principalmente se a empresa tem que comprar energia elétrica no mercado a vista horário ou diário para cumprir suas obrigações contratuais. Se a combinação de riscos operacionais e de mercado podem resultar em perdas além do nível de tolerância da empresa, a gestão deveria considerar a aquisição de algum tipo de seguro contra estes eventos.(JONG, 2002).

No gráfico 11 a seguir pode-se observar a média dos preços reais do mercado australiano comparado com preços simulados obtido utilizando um processo de reversão à média com difusão de saltos calibrado com dados históricos deste mercado. Repare que não existe uma boa correlação entre as ocorrências dos picos reais e os picos simulados, porém o formato geral da curva de preço é bastante similar em ambos os gráficos. Se o período de ocorrência dos saltos é de fato aleatório, então os preços simulados apresentados deveriam funcionar bem para avaliação de contratos. No entanto, se a existência de picos é dependente de outros fatores, como por exemplo ocorrência somente em meses muito frios ou muito quentes, então seria necessário um modelo bem mais refinado para capturar a sazonalidade dos picos.

GRÁFICO 11 - Comparativo entre preços reais e preços simulados pelo processo de reversão à média com difusão de saltos



FONTE: Adaptação do autor

Repare que o contorno da curva tem uma correlação bastante elevada e os picos acontecem na mesma proporção, no entanto aparecem mais espalhados na simulação devido a se ter utilizado uma velocidade de reversão de pico igual a 100%, enquanto no mercado a vista real esta velocidade pode ser menor, fazendo com que alguns picos apareçam em intervalos consecutivos. Esta conclusão está embasada no resultado de uma série de simulações efetuadas com os parâmetros extraídos do mercado australiano NSW em 2000, onde para cada mês foram utilizados os valores $S^*(t)$ (valor de reversão à média em cada instante), α (velocidade de reversão à média variando entre os valores máximo e mínimo do mês), σ (volatilidade variando entre os valores máximo e mínimo do mês), δ (desvio padrão de pico máximo do mês), e percentual de picos em cada mês.

Esta observação será melhor explorada quando da explicação da construção do simulador. No entanto, baseado em simulações, vale salientar que, para a precificação do prêmio de opções de compra mensais, este efeito não é relevante.

4.2 Precificação de opções de compra (Call) de eletricidade

Para Jong (2003), uma das soluções para precificação de opções de compra de eletricidade é separar o preço da opção em duas componentes; uma componente de reversão à média e outra componente de salto. O peso dado a cada componente é determinado pela probabilidade de ocorrência dos saltos. A razão pela qual duas componentes de opção podem ser somadas de forma proporcional, é que os preços dos saltos são independentes dos preços de reversão à média.

$$\text{Opção} = \%pico \cdot \text{Opção}_P + (1 - \%pico) \cdot \text{Opção}_R$$

Onde: $\%pico$ é a probabilidade do regime de pico ocorrer.

É importante observar que para qualquer período analisado o “preço A vista” não é uma média ponderada dos preços de reversão e dos preços de pico, porém ou é um preço de pico ou é um preço de reversão á média.

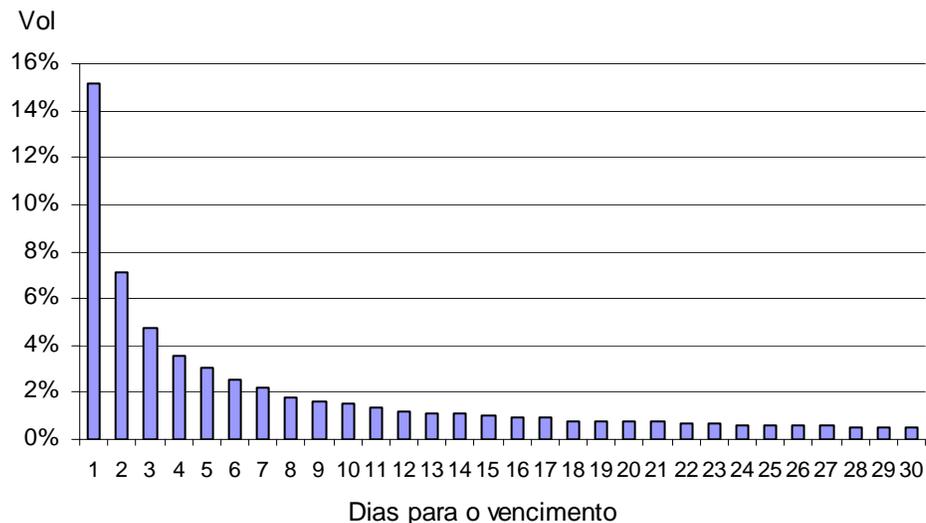
Segundo Huisman (2002) Nos mercados de energia elétrica, contratos derivativos de longo prazo possuem uma volatilidade significativamente mais baixa do que contratos de curto prazo. Isto se dá devido às expectativas do preço a vista variarem consideravelmente mais do que as expectativas dos níveis de preços em um futuro distante. Este fenômeno impacta diretamente

na volatilidade, que decai progressivamente com o tempo, ou seja, cada vencimento tem sua própria volatilidade reduzida em função do tempo de maturação.

Clelland e Strickland (1999) e Lucia e Schwartz (2002) apresentaram, através de uma equação, como a volatilidade de contratos de opção se comporta para diferentes vencimentos quando de uma simulação de reversão à média. A equação exprime a volatilidade dos prêmios de contratos de opção como função da difusão dos preços a vista da eletricidade σ , da velocidade de reversão à média α e do tempo para o vencimento do contrato t .

$$\text{Vol}_t = \frac{\sigma}{2\alpha t} (1 - \exp(-2\alpha t)) \quad (13)$$

GRÁFICO 12 – Volatilidade de contratos de opção em diferentes vencimentos



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 12 foi construído a partir da equação 13 com valores de $\alpha = 12\%$ e $\sigma = 17\%$. Percebe-se claramente que a volatilidade do valor do prêmio da opção, para o modelo de reversão à média, cai rapidamente à medida que o vencimento do contrato se distancia.

A aplicação direta do resultado da fórmula de Black & Sholes (1976) conduz ao valor de uma opção de compra europeia com vencimento em t a um preço de exercício (Strike price) K .

Onde:
$$\text{Opção}(t, K, S_t, \text{Vol}_t) = \exp(-r t) \cdot \left\{ S_t N(d) - KN(d - \text{Vol}_t \sqrt{t}) \right\} \quad (14)$$

$$d = \frac{\ln \left[\frac{S_t}{K} \right] + \frac{1}{2} \text{Vol}_t^2 \cdot t}{\text{Vol}_t \cdot \sqrt{t}} \quad (15)$$

Pela equação anterior, observa-se que o valor da opção é função do tempo de vencimento da opção t , do preço de exercício (K), do preço a vista no instante t (S_t) e da volatilidade do preço futuro no instante t (Vol_t).

Segundo Strickland (2003), o valor da opção deve ser dividido em uma componente de reversão à média e outra componente de salto. A primeira componente pode ser calculada através da equação (14) com a substituição do preço total S_t pelo preço de reversão à média S_{Rt} dividido pela probabilidade do preço de reversão à média ($1 - \%pico$).

$$Opção_R = Opção \left[t, K, \frac{S_{Rt}}{(1-\%pico, t)}, Vol_t \right]$$

Strickland afirma ainda que a segunda componente pode, da mesma forma, ser calculada através da fórmula de Black & Sholes (1976) com uma modificação da variável “ d ”, onde o valor de S_t (preço a vista) deve ser substituído pelo valor esperado de pico “ $E[Pico]$ ”, e a volatilidade do preço de pico futuro é independente do tempo.

$$\text{Desta forma teremos: } Opção_p = \exp(-rt) \cdot \{ E[Pico] N(d') - KN(d' - \sigma_p) \}$$

$$\text{Onde: } d' = \frac{\ln \left[\frac{E[Pico]}{K} \right] + \frac{1}{2} (\sigma_p)^2}{\sigma_p}$$

A expectativa da amplitude de pico é obtida da equação 12 apresentada no capítulo 2:

$$E[Pico] = S^* (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})$$

Conforme colocado por Strickland anteriormente, a volatilidade σ_p foi definida como constante cujo valor assumido foi o valor médio de 20% do mercado australiano.

A remuneração da opção de compra para os preços de pico será igual ao valor máximo entre zero e a diferença entre o preço de pico e o preço de exercício da opção. Como os preços nos dois regimes são independentes um do outro, o preço real da opção é a soma das componentes ponderadas pelas respectivas probabilidades. O valor da opção resultante do modelo de troca de regimes (reversão à média com saltos) para o preço a vista, diverge do valor da opção calculada somente através do modelo de reversão à média. Na tabela 1 a seguir os

valores da opção foram calculadas para opções de compra com vencimentos em 1, 7, 15 e 46 dias, cujos valores de exercício são de 20, 30, 40 e 50 \$/MWh.

TABELA 1 – Comparativo entre Modelos de Precificação de Opção

		Modelo de reversão à média				Modelo de reversão à média com saltos			
		Preço de exercício				Preço de exercício			
		\$20,00	\$30,00	\$40,00	\$50,00	\$20,00	\$30,00	\$40,00	\$50,00
Vencimento (dias)		Valor da opção				Valor da opção			
		1	\$13,70	\$4,17	\$0,24	\$0,00	\$13,81	\$4,26	\$1,89
7	\$12,50	\$3,36	\$0,19	\$0,00	\$12,70	\$5,55	\$4,09	\$3,10	
15	\$10,25	\$1,43	\$0,01	\$0,00	\$10,45	\$5,45	\$4,11	\$3,12	
46	\$8,43	\$0,19	\$0,00	\$0,00	\$8,64	\$5,45	\$4,11	\$3,12	

FONTE: Erasmus Research Institute of Management, 2002

No modelo de reversão à média, as volatilidades caem exponencialmente até zero à medida que os vencimentos se afastam. A volatilidade teórica do contrato da tabela 1, por exemplo, reduz de 13% para um contrato de vencimento de 1 dia, para menos de 1% para um contrato de 46 dias (menos de 2 meses a frente). O efeito da redução de volatilidade nos valores da opção são muito fortes: O modelo de reversão à média indica que dificilmente existe um valor para uma opção com mais de 5 ou 10 dias do vencimento, pois os preços sempre revertem para o valor de longo prazo. O modelo com reversão à média e saltos, leva em consideração que a tendência deve ser em direção ao nível de longo prazo, mas os preços ainda podem se desviar disto em dias específicos devido aos picos. Os picos indicam que opções de longo prazo também possuem um valor substancial.

De acordo Jong (2002)

o modelo de reversão à média indica que opções de compra altamente fora do valor de exercício dificilmente possuem valor para execução. A diferença entre os dois modelos é melhor observado em opções com preço de exercício de 50 \$/MWh. O modelo de reversão à média mostra que estas opções estão praticamente sem valor, embora sabe-se que não é impossível que os preços a vista alcancem preços acima de 50 \$/MWh em dias individuais. Isso mostra que até mesmo opções com altos níveis de preço de exercício possuem um valor considerável, que é inteiramente ignorado pelo modelo de reversão à média. Com a utilização do modelo de reversão à média sem saltos, os custos de aquisição de energia podem ser subestimados. Suponha um contrato onde o consumidor final paga o preço a vista da energia, porém possui uma opção de compra cujo valor de exercício é de 50 \$/MWh. Caso este consumidor desejasse efetuar a opção de compra no sétimo dia de vencimento, no modelo de precificação com reversão à média e saltos ele teria comprado uma opção cujo prêmio seria de 3,105 \$/MWh, enquanto no modelo de reversão à média sem saltos o supridor iria cobrar um prêmio igual a zero para fornecer a energia à 50 \$/MWh, independentemente do preço a vista no momento

CAPÍTULO 5

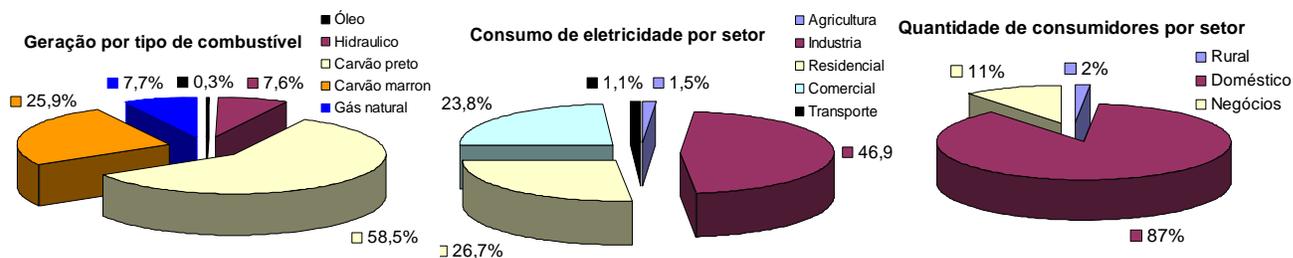
5 – Introdução ao Mercado Nacional de eletricidade australiano - Australian National Electricity Market (NEM)

O Mercado Nacional de Eletricidade Australiano (NEM) começou operando como um mercado atacadista de fornecimento de energia elétrica para distribuidores e usuários finais em dezembro de 1998 nos estados de Queensland (QLD), New South Wales (NSW), Teha Australian Capital Territory (TAC), Victoria (VIC) e South Austrália (SA). O NEM opera o maior sistema de energia elétrica interconectado do mundo, cobrindo distâncias de mais de 4000 Km para uma demanda de quase 8 milhões de consumidores finais e chegando a negociar cerca de 7 bilhões de dólares australianos anuais.

Parte dos ativos que compõem a infra-estrutura do NEM são de propriedade do governo do estado e também operacionalizadas por esta entidade, outra parte pertence às empresas privadas como também sua operacionalização. A negociação entre os geradores e os consumidores de eletricidade é realizada através de um pool, onde o despacho de energia das geradoras são coordenados e agendados de acordo com a demanda, preços ofertados no leilão e logística de transmissão no momento. O pool não é um local físico, mas um conjunto de regras e procedimentos geridos em conjunto com os participantes do mercado e a agência reguladora. Duas características da eletricidade fazem dela um bem ideal para ser comercializado no modelo de pool australiano:

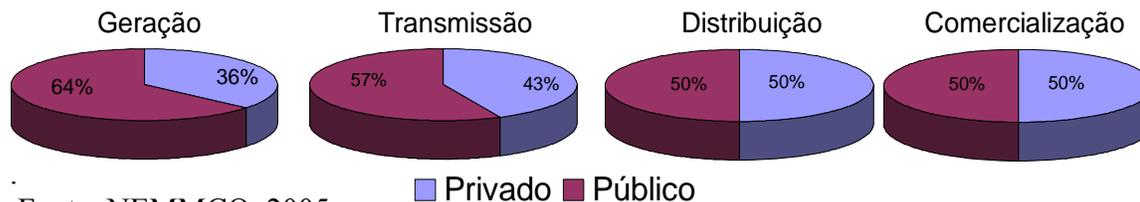
- A eletricidade não pode ser armazenada para uso futuro, por isso o suprimento varia dinamicamente de acordo com a variação da demanda.
- Para os usuários é indiferente a origem da geração de uma unidade de eletricidade, pois é impossível se determinar qual gerador produziu qual unidade de energia elétrica.

FIGURA 2 - Constituição do mercado de energia elétrica australiano.



Fonte :NEMMCO, 2005

FIGURA 3 - Propriedade dos ativos do NEMMCO



Fonte: NEMMCO, 2005

O National Electricity Market Management Company Limited (NEMMCO) é uma empresa que foi estabelecida em 1996 para administrar, desenvolver e melhorar continuamente a eficiência do NEM, tendo como membros alguns representantes dos governos de QLD, NSW, ACT, VIC e SA, que são nomeados diretores para a gestão desta companhia. NEMMCO é uma companhia sob leis corporativas sem fim lucrativo que opera através da recuperação dos custos de operação do NEM e gerindo a organização com taxas de administração aplicadas aos participantes do mercado.

O Código nacional de eletricidade australiano tem as seguintes premissas:

- Ser competitivo
- Facilitar a escolha do fornecedor para todos os consumidores finais
- Promover acesso livre para as redes de transmissão e distribuição
- Não favorecer participantes existentes em detrimento de participantes em potencial
- Não favorecer um tipo de combustível ou tecnologia em detrimento de outros.
- Não favorecer o mercado interno de um estado em detrimento do mercado de outro estado.

5.1- O Mercado a vista

As negociações no mercado de eletricidade são conduzidas como um mercado a vista, onde a oferta e demanda de curto prazo são instantaneamente casadas através de um processo de coordenação centralizado. As Geradoras ofertam despachar para o mercado quantidades de energia elétrica a um determinado preço, cujas ofertas são submetidas a cada 5 minutos em todos os dias da semana. A partir das ofertas submetidas, o sistema da NEMMCO seleciona os geradores necessários para produzir energia baseado no princípio de atender a demanda através

da melhor relação custo-benefício, despachando desta forma somente os geradores necessários para suprir aquela demanda.

Preços de despacho de energia são calculados em intervalos de 5 minutos, onde a média de 6 preços de despacho consecutivos são utilizados para formar o preço a vista para o intervalo de negociação de 30 minutos para cada uma das regiões do NEM.

O código determina que o preço a vista limite permitido é de \$10.000 por MWh, devendo este ser o preço máximo que o gerador pode ofertar no mercado. O valor máximo é também chamado de valor de carga perdida, cujo preço é automaticamente assumido quando NEMMCO e os provedores de serviço da rede são obrigados a interromper o suprimento de consumidores a fim de manter a oferta e a demanda balanceadas no sistema.

O custo de suprimento de energia varia de local para local, dependendo de dois aspectos da transmissão, em primeiro as perdas, que são ocasionadas à medida que a energia é transportada de onde é produzida para onde é consumida, em segundo as restrições ou congestionamentos que são encontradas à medida que a energia é transportada ao longo da rede.

5.2 - Confiabilidade e segurança

Em situações normais, o mercado mantém a oferta e a demanda balanceadas, no entanto em situações extraordinárias ou durante períodos de insuficiência de carga, quando a segurança e/ou a confiabilidade de suprimento estão comprometidas, NEMMCO tem a autoridade de utilizar uma variedade de ferramentas para novamente estabelecer o balanceamento entre oferta e demanda. Estas ferramentas incluem gestão de demanda, direcionamento de fornecimento, corte de carga e negociação de reservas.

a - Gestão de demanda

Refere-se a situações em que os consumidores reduzem seus consumos de energia em resposta à uma mudança nas condições do mercado, tais como elevado preço a vista, sendo esta uma ação deliberada tomada quando a demanda por eletricidade faz com que os preços da energia subam de forma abrupta.

Nestas condições, cargas “agendadas” são capazes de serem retiradas do mercado quando o preço da eletricidade alcança um determinado patamar, voltando a ser restabelecida quando os preços caem para os níveis de leilão. Esta estratégia é uma resposta de curto prazo quando de

uma limitação no suprimento de eletricidade no mercado, permitindo com isso minimizar ou mesmo evitar a elevação de preço sem danificar o processo de produção.

Uma outra estratégia, chamada rotatividade, é utilizada quando o suprimento é intencionalmente deslocado para um período onde haja menor demanda de mercado e conseqüentemente onde o preço a vista é mais baixo; o aquecimento de água em horários fora de pico é um exemplo de deslocamento de demanda de eletricidade para um período de baixa demanda.

b - Comercialização de reservas

Quando NEMMCO tem informações de uma provável insuficiência de suprimento, em que a margem mínima de reserva será comprometida, NEMMCO deve se encarregar por contratos de suprimento que normalmente não são parte da previsão provida pelo mercado. Nessas horas geradores emergenciais e aqueles conectados diretamente a rede de distribuição podem entrar com contratos para aumentar o suprimento no NEM de forma a evitar uma interrupção de larga escala no suprimento de energia elétrica.

c - Direcionamento de fornecimento

Quando alguns geradores têm problema em gerar a capacidade total ofertada para o mercado e uma queda no suprimento é esperada, NEMMCO tem o poder de orientar os geradores para produzir uma maior quantidade de energia elétrica. NEMMCO somente utiliza este poder de redirecionamento para proteger a confiabilidade e a segurança do sistema.

d - Corte de carga

Em um evento mais improvável em que a demanda em uma região excede a capacidade de suprimento, NEMMCO pode instruir os provedores da rede a desconectar alguns clientes. Esta ação seria levada a cabo somente quando houvesse necessidade de redução da demanda de forma a se atingir o balanceamento do sistema. Este tipo de ação é conhecido como corte de carga, que resulta em um apagão generalizado em áreas supridas pelo NEM. O Corte de carga é levado em consideração devido à segurança do sistema estar em prioridade mais elevada do que do que a confiabilidade.

Durante o período de corte de carga, o suprimento é retirado das regiões (afetadas pela insuficiência no fornecimento) proporcionalmente aos níveis de demanda no período em que

houver a escassez. O processo de redução proporcional é utilizado para determinar o montante de corte de carga para cada região afetada até o limite máximo da capacidade de transferência das interconexões. Uma vez que as interconexões estão em seus limites de transferência, a região importadora deverá arcar com o seu próprio corte de carga localmente.

5.3 - Operação do NEM

A operação do NEM envolve a coordenação de sucessivas atividades para facilitar as negociações entre os produtores e os consumidores do mercado de energia elétrica. Estas atividades incluem estabelecimento de níveis de demanda, recebimento de oferta de suprimento, agendamento e despacho das geradoras, estabelecimento do preço a vista e medição do uso da eletricidade.

5.3.1 - Demanda

A operação do NEM tem como base a previsão da demanda de eletricidade, que possui uma variação de região para região dependendo da população, temperatura e da distribuição da indústria e do comércio em cada local. A demanda também varia ao longo do dia, com picos diários de consumo que ocorrem principalmente entre 7:00 hs e 9:00 hs e entre 16:00 h e 19:00 h.

Um nível típico de demanda de eletricidade dentro do NEM é aproximadamente de 21.000 MW em dias úteis de temperaturas médias. O sistema somente sofre pressão de suprimento em raras ocasiões do ano devido à alta demanda momentânea, cuja duração é de geralmente algumas horas. Como os picos de demanda não ocorrem simultaneamente em todas as regiões, o suprimento total pode ser compartilhado entre as regiões utilizando a rede de interconexão.

Os níveis de demanda em certas regiões são caracterizados por picos pontuais de consumo durante os meses de verão, que são tratados através de uma logística de despacho e negociações entre mercados, ao invés de possuir uma sobre-capacidade de carga no sistema, que tornaria a energia elétrica bem mais cara. Os picos de demanda e conseqüentemente os preços de energia, são trabalhados através de uma combinação de geradores, que foram construídos para despacho em cenários de demanda extrema, e consumidores que voluntária e temporariamente param de consumir eletricidade quando o preço a vista ultrapassa um determinado patamar.

5.3.2 - Suprimento

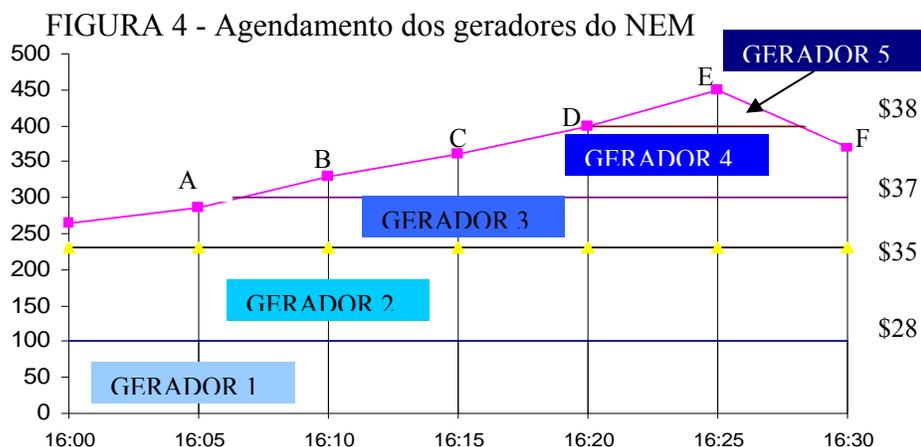
A entrega de energia para os consumidores do NEM passam pelas seguintes etapas:

No NEM, os geradores são obrigados a submeter suas ofertas indicando o volume de eletricidade que a geradora tem capacidade de produzir a um determinado preço. Existem três tipos de leilão:

- Leilões diários, que são submetidos antes das 12:30hs no dia anterior ao suprimento e que refletem na previsão de pré-despacho.
- Re-leilões, que podem ser submetidos até aproximadamente 5 minutos antes do despacho, onde o volume de eletricidade do leilão original pode ser alterado, porém o preço de oferta não pode.
- Propostas padrões, que são aplicadas onde os leilões diários não foram efetuados, cuja natureza é comercialmente confidencial e geralmente refletem o nível base de operação para as geradoras.

5.4 - Agendamento e despacho de geradores

A partir dos leilões, o sistema da NEMMCO indica os geradores que irão suprir a demanda do mercado, em que horário, e qual o volume. As ofertas são empilhadas em ordem crescente de preços e em seguida são agendadas e despachadas para produção, de forma que a utilização da pilha é agenda na seqüência crescente de preços, ou seja, à medida que a demanda total por eletricidade aumentar, os geradores são agendados e despachados na seqüência da oferta mais barata para a mais cara. Algumas vezes, por limitação da capacidade da rede de transmissão, incluindo interconexões entre regiões, é necessário agendar geradores para a produção fora da ordem crescente de preços, de forma a produzir a quantidade necessária para cobrir a demanda.



Fonte: NEMMCO 2004

As ofertas para produzir eletricidade que são recebidas pelo NEMMCO são classificadas em ordem crescente de preço para cada período de despacho. Os geradores são então agendados progressivamente para a produção, de forma a igualar a demanda com geração do menor para o maior custo de produção.

- A – Para suprir a demanda às 16:05 hs, os geradores 1 e 2 são despachados em toda a sua capacidade de produção, o gerador 3 é apenas parcialmente despachado e o preço final é obtido como sendo o maior preço de geração, que no caso foi de \$35 por MWh.
- B – Às 16:10 hs, quando de um aumento de demanda, os geradores 1, 2, 3 são despachados em sua capacidade total e o gerador 4 é parcialmente despachado. Neste instante o preço atinge o patamar do gerador despachado mais caro de \$37 por MWh.
- C – Às 16:15 hs, a demanda aumenta em torno de 30 MW a mais, fazendo com que os três geradores 1, 2 e 3 sejam completamente despachados, porém ainda sem a necessidade de despachar o quarto gerador por completo. O preço permanece então em \$37 por MWh.
- D – Às 16:20 hs, a demanda aumenta até o ponto em que o gerador 4 consegue suprir a demanda do sistema sem a necessidade do gerador 5 entrar em produção. Neste instante o preço continua \$37 por MWh, que é o preço de despacho ofertado pelo gerador 4.
- E – Às 16:25 hs, depois de mais um incremento de demanda, os geradores 1, 2, 3 e 4 são despachados em sua capacidade total e o gerador 5 começa produzir energia parcialmente para suprir o incremento da demanda. O preço é então elevado para \$ 38 por MWh.
- F – Às 16:30 hs, depois de uma queda na demanda de aproximadamente 80 MW, o gerador 5 não é mais necessário para a suprir a demanda do momento, além disso o gerador 4 é requerido somente de forma parcial. O preço então cai para o valor de despacho do gerador mais caro sendo despachado (gerador 4) que é de \$37 por MWh.

O preço a vista para o período de negociação é calculado como a média de preços de seis despachos consecutivos, que no caso é:

$$\$ (35 + 37 + 37 + 37 + 38 + 37) / 6 \text{ por MWh} = \$36,8 \text{ por MWh.}$$

Este é o preço que todos os geradores recebem para a produção durante este período e também o preço que todos os consumidores deste mercado pagam pelo consumo de eletricidade do pool durante este período.

5.5 - Determinação do preço a vista

NEMMCO publica instruções de despacho para os geradores baseado nas ofertas que eles apresentaram no processo de leilão para intervalos de 5 minutos a cada dia, significando existirem 288 intervalos de despacho todos os dias.

O intervalo de negociação no NEM é um período de 30 minutos, significando que existem 48 intervalos de negociação em um dia. O preço para o intervalo de negociação é chamado preço a vista, que vem a ser a média de seis despachos consecutivos. Existe um preço a vista para cada intervalo de negociação em cada um dos 5 mercados do NEM.

Limites na capacidade de interconexão são fatores que contribuem para que os preços entre as regiões variem. Outro fator é a utilização de diferentes fontes de combustível para suprimento em diferentes regiões do NEM. Por exemplo, devido ao gás ser um combustível mais caro do que carvão ou a água, a geração através deste combustível impacta no preço a vista da região e é repassado para o consumidor quando este combustível é utilizado.

Outros fatores tais como capacidade total do sistema, falha na geração de energia na planta geradora, controle de frequência, controle de voltagem, falha na transmissão, afetam também os preços de despacho.

Durante o ano de 2003 a média diária do preço da energia incluindo todas as regiões do NEM, foi menos de \$40/MWh para mais de 90% dos intervalos de negociação, ou seja, estavam abaixo do valor de pico mínimo do ano. Isso não significa, no entanto, que 10% são valores de pico, pois o nível de reversão à média é quem determina a amplitude de pico em cada instante.

5.6 - Previsão da demanda do mercado

NEMMCO faz um planejamento de previsão como um pré-requisito para manter o suprimento e a demanda em equilíbrio, cujo principal processo é o rastreamento de qualquer tipo de limitação na capacidade de geração das geradoras, como também restrições na rede de transmissão. Isto permite ao restante dos participantes do mercado a reagir a uma possível insuficiência, através do aumento da geração ou capacidade de transmissão no mercado.

Indicadores considerando tais insuficiências são enviados para todos os participantes do mercado através de uma variedade de ferramentas de previsão destinadas à melhoria da eficiência operacional do sistema.

5.6.1 -Oferta e demanda

O processo de agendamento e despacho das geradoras é gerido de forma a cobrir a demanda do mercado através de uma oferta no leilão que é realizada todos os dias a cada 5 minutos, desta forma os geradores são despachados com o preço a vista determinado para cada intervalo de 30 minutos. Este processo gera um sinal dinâmico de preço que orienta os participantes para os próximos leilões de suprimento do mercado.²

² O capítulo 5 está baseado na publicação do NEMMCO, no site: www.nemmco.com.au, 2005.

CAPÍTULO 6

6 – Resultado da simulação no mercado australiano

Neste capítulo abordar-se-á como foi efetuada a avaliação de risco para o mercado australiano. Escolheu-se este mercado, principalmente devido a este ser um mercado altamente evoluído e com disponibilidade de dados históricos para um período de 6 anos apresentados a cada 30 min. Serão efetuadas as etapas de extração quantitativa dos parâmetros do mercado australiano NSW para 6 anos consecutivos de 1999 à 2004, elaboração dos valores dos parâmetros a serem utilizados na calibração, construção do simulador, simulação e obtenção de resultados. As equações que serão utilizadas para a modelagem dos preços da eletricidade e para a precificação de opções são:

Equação para Modelagem dos preços da energia elétrica

$$S_{t+1} = \left\{ S_{t(r)} + \alpha(S^* - S_{t(r)}) + S_{t(r)} \sigma \varepsilon_{1t} \right\} \text{ OU } \left\{ -\alpha_p S_{t(p)} + \eta [S^* (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})] \right\}$$

$S_{t(r)}$: Preço a vista do regime de reversão no instante t

$S_{t(p)}$: Preço a vista do regime de pico no instante t

S^* : Nível de reversão à média

α : Velocidade de reversão à média

α_p : Velocidade de reversão de pico

σ : Nível de difusão

η : Possibilidade de ocorrência de um pico, cujo valor é 1 ou 0

$\varepsilon_{1t} \varepsilon_{2t}$: Valores aleatórios entre -1 e 1 e valor médio igual zero, cuja curva de ajuste é normal.

Equação para Precificação da opção de compra

$$\text{Opção} = \% \text{pico} \cdot \text{Opção}_p + (1 - \% \text{pico}) \cdot \text{Opção}_r$$

$$\text{Opção}_r = \text{Opção} \left[t, K, \frac{S_{Rt}}{(1 - \% \text{pico})_t}, \text{Vol}_t \right]$$

$$\text{Opção}_p = \exp(-rt) \cdot \{ E[\text{Pico}] N(d') - KN(d' - \sigma_p) \}$$

Opção_r : Preço da opção no regime de reversão à média

Opção_p : Preço da opção no regime de pico

S_{Rt} : Preço a vista do regime de reversão à média

%pico: Probabilidade de ocorrência de pico

Vol: Volatilidade do preço futuro no regime de reversão à média

r : Taxa livre de risco

t: tempo em dias

E[Pico]: Valor esperado de pico

N : Normal

K – Strike – Preço de exercício

σ_p: Volatilidade do preço futuro no regime de pico

$$d' = \frac{\ln \left[\frac{E[\text{Pico}]}{K} \right] + \frac{1}{2} (\sigma_p)^2}{\sigma_p}$$

6.1 - Extração de parâmetros

A partir do levantamento dos dados do mercado australiano extraiu-se os parâmetros necessários para efetuar uma análise e dar início às simulações. Os parâmetros extraídos foram a curva de reversão à média, preços de pico (frequência e amplitude), volatilidade e velocidade de reversão à média.

A entrada de dados para a extração dos parâmetros contemplou os seguintes itens: Data (dia, mês, ano, hora); Consumo em MWh; Preço A vista; em intervalos de 30 min.

A tabela 2 mostra um exemplo resumido da tabela obtida de extração dos parâmetros do mercado NSW para os anos de 1999 a 2004. Os valores mínimo, máximo e média correspondem a todos os meses destes seis anos, no entanto, estes valores foram extraídos para cada um dos meses do ano, de forma a podermos efetuar a modelagem de preços e precificação da opção mensalmente.

TABELA 2 – Extração dos parâmetros do Mercado australiano NSW

Mês	Mínimo	Máximo	Média
Quantidade de picos	271	587	427
Tamanho médio picos	3,5	19,3	12,1
Preço médio com pico	R\$ 22,67	R\$ 45,15	R\$ 33,79
Preço médio sem pico	R\$ 19,76	R\$ 31,24	R\$ 26,84
Preço mínimo	R\$ 1,47	R\$ 7,81	R\$ 3,69
Preço máximo	R\$ 3.275,02	R\$ 9.909,03	R\$ 6.481,76
Preço de pico médio	R\$ 75,96	R\$ 553,41	R\$ 320,90
Preço de pico mínimo	R\$ 32,51	R\$ 52,41	R\$ 41,08
Preço de pico máximo	R\$ 3.275,02	R\$ 9.909,03	R\$ 6.481,76
Desvpad pico	175	1.230	675
% pico	1,55%	3,35%	2,44%
α	9,62%	16,09%	11,79%
σ	10,43%	20,03%	14,45%
δ	129	436	250
Consumo MWh	133.380.169	148.453.013	141.152.166

FONTE: Adaptação do autor

Parâmetros extraídos:

- **Curva de reversão à média**

a) Extraíu-se a média móvel correspondente a um período de 1 mês (15 dias para trás e 15 dias para frente) para cada meia hora dos dados históricos.

b) Definiu-se que os preços a vista com amplitude maior ou igual a 2 vezes a amplitude da média móvel descrita anteriormente seriam considerados como preços de pico.

c) Substituiu-se os preços de pico da serie histórica por seus valores de não pico precedentes.

c) Extraíu-se outra média móvel sem os picos (mesma forma que o item a). Esta nova media móvel foi considerada como a curva de reversão à média.

A segunda média móvel foi aplicada como um filtro adicional, de forma a eliminar os picos embutidos na primeira média e poder suavizar a curva, pois estes picos não devem ser considerados na obtenção da média de longo prazo (curva de reversão à média).

Tem-se também que calcular a nova quantidade de picos, pois o nível da nova média móvel foi reduzido após esta operação.

Poder-se-ia efetuar este processo até que a quantidade de picos encontrada em duas etapas consecutivas seja igual, no entanto, para simplificação e maior velocidade operacional, utilizou-se apenas duas etapas de filtragem.

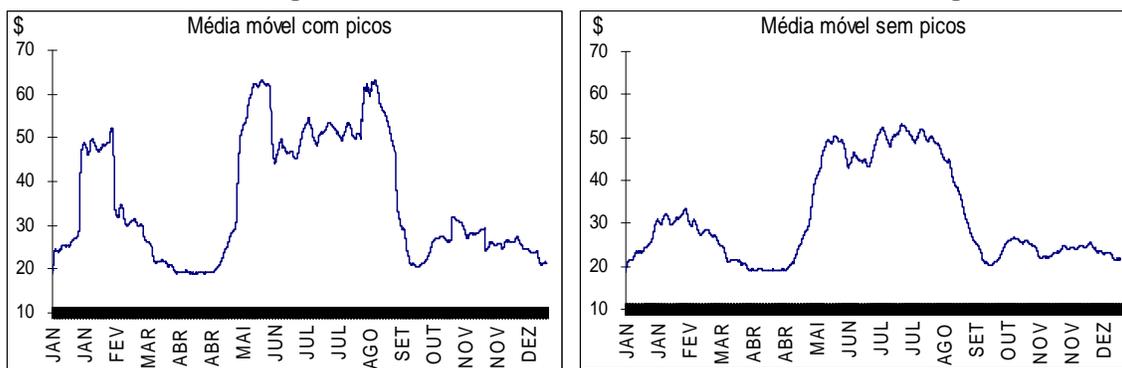
Na amostra abaixo (tabela 3), percebe-se que na primeira etapa obtêm-se um determinado nível para a média móvel (Média móvel preço com pico) e apenas um valor de pico aparece no intervalo apresentado (Pico nível 1), após uma segunda filtragem, verifica-se que o nível da curva média móvel (Média móvel preço sem pico) reduziu e a quantidade de picos aumentou para 2 (Pico nível 2).

TABELA 3 – Demonstração do cálculo da curva de reversão à média em planilha excel

Data	Consumo MWh	Preço \$	Média Móvel Preço com pico	PICO Nível 1	Elimina Preço Pico	Média Móvel Preço sem pico	PICO Nível 2
1/1/01 0:30	6.283	32,56	31,23	0	32,56	31,16	0
1/1/01 1:00	6.040	36,98	31,23	0	36,98	31,16	0
1/1/01 1:30	5.728	22,50	31,23	0	22,50	31,17	0
1/1/01 2:00	5.501	27,02	31,24	0	27,02	31,18	0
15/1/01 0:00	6.760	22,57	34,52	0	22,57	33,76	0
15/1/01 0:30	6.488	34,66	34,51	0	34,66	33,78	0
15/1/01 1:00	6.271	28,17	34,45	0	28,17	33,78	0
15/1/01 1:30	7.093	102,62	34,44	0	31,62	33,79	1
31/1/01 23:00	7.700	31,28	43,94	0	31,28	33,28	0
31/1/01 23:30	8.372	198,33	44,46	1	31,28	33,28	1
1/2/01 0:00	7.615	37,92	43,94	0	37,92	33,27	0
1/2/01 0:30	7.374	46,36	43,95	0	46,36	33,26	0

FONTE: Adaptação do autor

GRÁFICO 13 – Comparativo entre a média móvel de 30 dias com e sem picos.



FONTE: Adaptação do autor

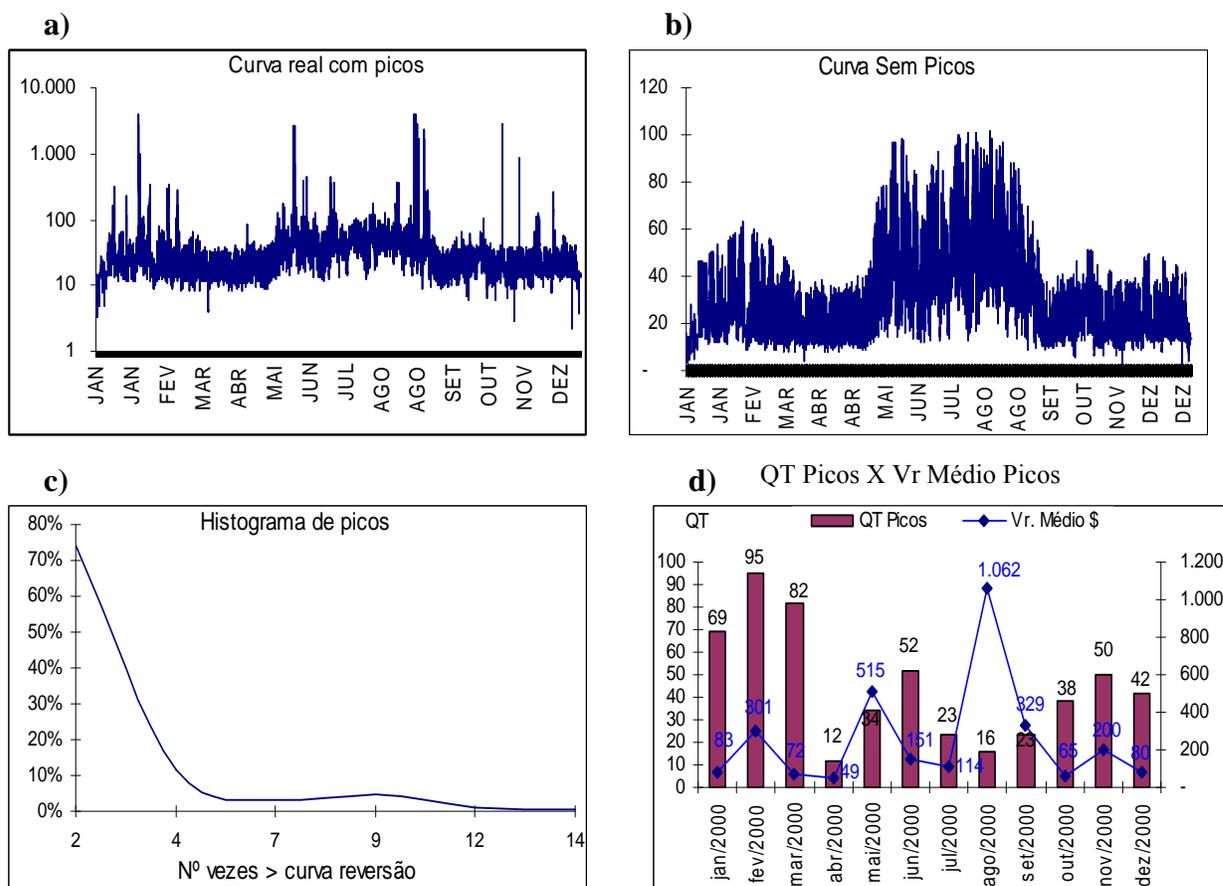
No gráfico 13 percebe-se uma redução no nível médio da curva de reversão, como também uma suavização em seu contorno após a aplicação da segunda filtragem (média móvel sem picos). A média móvel sem picos é a curva de reversão à média utilizada na simulação.

- **Preços de pico**

a) A quantidade de picos para cada mês do ano foi obtida através de uma simples contagem da quantidade de amplitudes maior ou igual a 2 vezes a curva de reversão à média

b) O tamanho dos picos foram medidos como a quantidade de vezes maior que o nível de reversão à media

GRÁFICO 14 – Extração de parâmetros no mercado Australiano NSW no ano 2000



FONTE: Adaptação do autor

O Gráfico 14 a) Mostra, em escala logarítmica, a evolução da curva de preços com todos os picos do mercado NSW no ano 2000. b) Evolução da curva de preços sem os picos. c)

Histograma de picos obtido a partir dos picos contabilizados. O eixo horizontal representa quantas vezes o pico é maior que a curva de reversão à média. d) Quantidade de picos e amplitude média em cada um dos meses.

Verifica-se que no histograma de picos que os valores estão mais concentrados em torno do valor 2 (quantidade de vezes maior que o nível de reversão à média).

- **Volatilidade (nível de difusão) σ :**

Desvio padrão de 1 mês da variação dos preços a vista (coluna H da tabela 4) a cada meia hora desconsiderando os preços de pico. Calculado com base na planilha excel apresentada por Blanco (2004).

- **Velocidade de reversão à média α :**

Inclinação (Slope) entre:

- 1) A diferença entre dois preços a vista consecutivos, desconsiderando os preços de pico (coluna I da tabela 4) e;
- 2) O preço a vista desconsiderando os preços de pico (Coluna G da tabela 4).

Calculado com base na planilha excel apresentada por Blanco (2004).

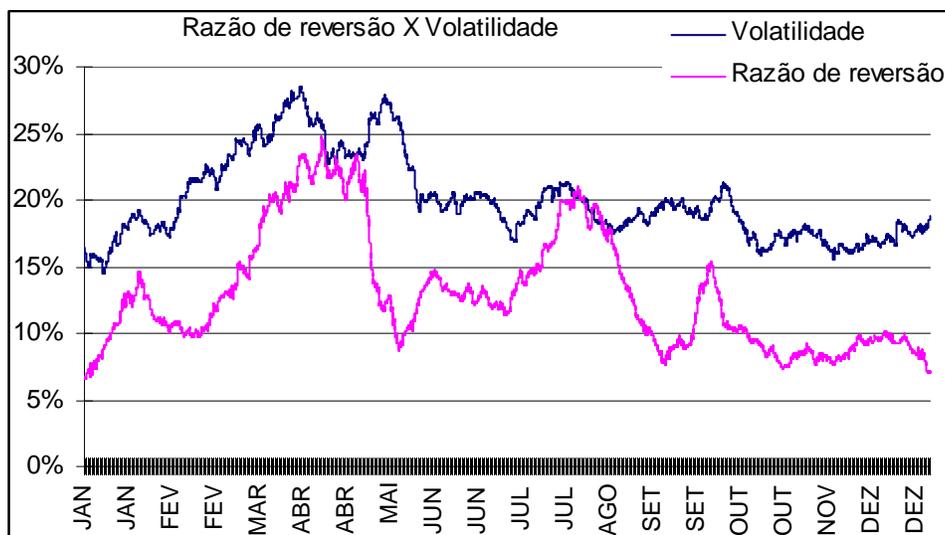
TABELA 4 – Planilha de cálculo da volatilidade e da razão de reversão à média.

		κ		2							
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Preço Spot	Média Móvel Preço com pico	PICOS nível 1	Elimina Preço Pico 1	Média Móvel Preço sem pico	PICOS nível 2	Elimina Preço Pico 2 (t+1)	Aumento %	Difer	Elimina Preço Pico 2 (t)	Vol σ	Vel Reg α
14,97	24,79	0	14,97	22,23	0	14,97	3%	0,42	14,55	16,3%	7,2%
15,04	24,79	0	15,04	22,23	0	15,04	0%	0,07	14,97	16,3%	7,2%
15,11	24,79	0	15,11	22,23	0	15,11	0%	0,07	15,04	16,3%	7,2%
17,40	24,80	0	17,40	22,24	0	17,4	15%	2,29	15,11	16,3%	7,2%
15,20	24,80	0	15,20	22,25	0	15,2	-13%	(2,20)	17,4	16,3%	7,2%
15,64	24,81	0	15,64	22,26	0	15,64	3%	0,44	15,2	16,3%	7,3%
17,36	24,81	0	17,36	22,26	0	17,36	11%	1,72	15,64	16,3%	7,2%
47,43	41,45	0	47,43	26,34	0	47,43	0%	(0,19)	47,62	17,4%	13,0%
25,25	41,68	0	25,25	26,49	0	25,25	12%	2,61	22,64	17,4%	12,8%
300,89	44,25	300,89	77,55	29,53	1	37,85	0%		37,85	18,8%	10,7%
315,53	44,25	315,53	77,55	29,53	1	37,85	0%		37,85	18,8%	10,6%
875,81	44,26	875,81	77,55	29,54	1	37,85	0%		37,85	18,8%	10,7%
182,93	44,26	182,93	77,55	29,54	1	37,85	0%		37,85	18,8%	10,6%
63,53	44,26	0	63,53	29,55	1	37,85	0%		37,85	18,8%	10,7%
55,89	44,25	0	55,89	29,54	0	55,89	48%	18,04	37,85	18,8%	10,7%
50,61	44,25	0	50,61	29,54	0	50,61	-9%	(5,28)	55,89	18,8%	10,8%
49,57	44,25	0	49,57	29,55	0	49,57	-2%	(1,04)	50,61	18,8%	10,7%
52,71	44,26	0	52,71	29,55	0	52,71	6%	3,14	49,57	18,8%	10,7%

FONTE: Adaptação do autor

Na tabela 4 verifica-se o detalhamento da planilha para obtenção dos parâmetros volatilidade σ e razão de reversão à média α . A partir do preço a vista do mercado NSW registrado a cada 30 minutos, obtém-se a curva de reversão à média, que está indicada na coluna “E” como “média móvel preço sem pico” calculada conforme indicado na tabela 3. $\kappa = 2$ é quantidade mínima de vezes sobre a curva de reversão que o preço a vista deve alcançar para que possa ser considerado um preço de pico. A coluna “G” é igual a coluna “A”, porém substituindo os preços de pico pelo seu valor de não pico anterior. A coluna “H” representa a variação de preço da coluna “G”, que é dada por $[(S_{t+1}/S_t) - 1]$. A coluna “I” indica a diferença entre dois preços consecutivos da coluna “G” ($S_{t+1} - S_t$). A Coluna “J” é igual a coluna “G” com defasem de um intervalo de tempo de 30 minutos. A coluna “K” dá a volatilidade do intervalo de um mês (média móvel) da coluna “H” centrado no preço em questão: Desvpad ($H_{-15\text{dias}} : H_{+15\text{dias}}$). Finalmente a coluna “L” calcula a inclinação entre as colunas “I” e “J” que representa a velocidade de reversão à média: Slope ($I_{-15\text{dias}} : I_{+15\text{dias}}; J_{-15\text{dias}} : J_{+15\text{dias}}$).

GRÁFICO 15 - Obtenção das curvas α e σ em planilha excel



FONTE: Adaptação do autor

O Gráfico 15 apresenta as curvas de volatilidade e reversão à média plotadas juntas com os dados obtidos do mercado australiano NSW para o ano 2000. Percebe-se que para este ano

existe uma certa correlação entre as curvas, como também que em raríssimos momentos o percentual de reversão à média é maior que o percentual de volatilidade.

6.2 - Construção e calibração do simulador

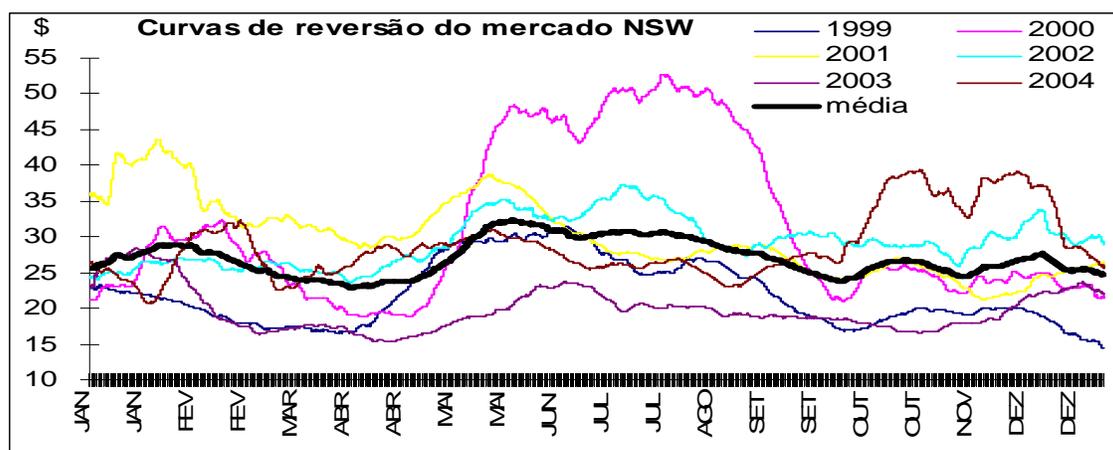
A partir do levantamento dos parâmetros do mercado, construiu-se e calibrou-se em planilha excel um simulador para a obtenção dos preços a vista, cálculo do valor da opção e geração de cenários para cada mês do ano.

6.2.1 Escolha dos parâmetros de calibração

- **Curva de reversão à média:**

A curva de reversão à média utilizada como parâmetro foi a média das curvas de reversão dos 6 anos em estudo (gráfico 16), porém com a introdução de um fator de crescimento aleatório (positivo/negativo) baseado nos crescimentos obtidos ao longo destes anos. O formato desta curva é sempre o mesmo, no entanto seu nível médio oscila de acordo com o crescimento aleatório “sorteado”, cujos valores variam desde a taxa máxima de crescimento dos preços, observada ao longo dos 6 anos, até a taxa mínima de crescimento (gráfico 17). A probabilidade de obtenção de cada uma das taxas é distribuída igualmente utilizando a fórmula da planilha excel “aleatório entre (max;min)”.

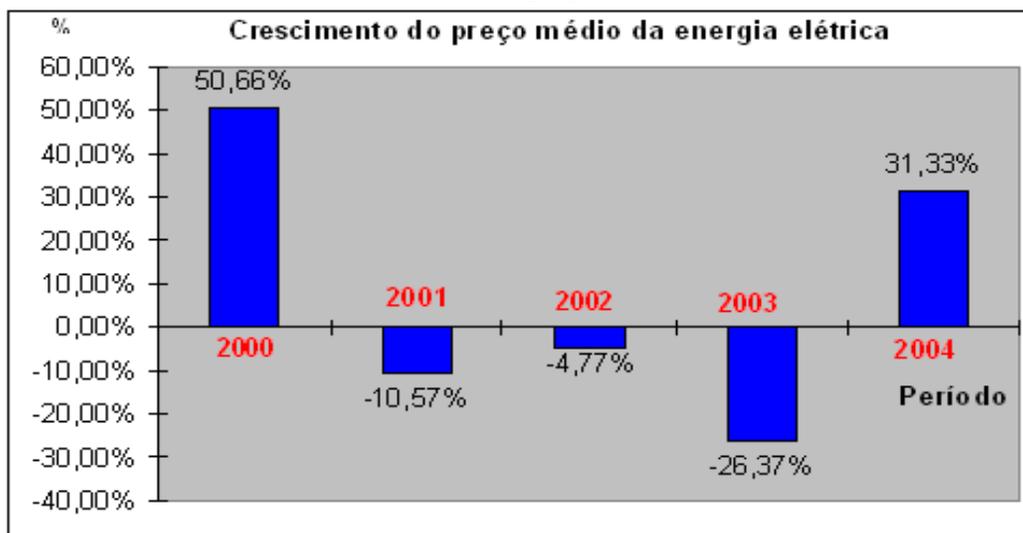
GRÁFICO 16 – Curvas de reversão à média do mercado NSW ao longo de seis anos



FONTE: Adaptação do autor

O Gráfico 16 apresenta as curvas de reversão à média do mercado NSW ao longo de seis anos e sua respectiva média com amostragem a cada 30 min.

GRÁFICO 17 – Taxa de crescimento dos preços de eletricidade no mercado NSW



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 17 mostra as taxas de crescimento do preço médio da energia elétrica no mercado australiano NSW entre os anos 2000 e 2004. Verifica-se que não existe uma tendência de crescimento, por isso, na simulação efetuada, foi considerado que qualquer valor entre a taxa de crescimento máxima e mínima, obtidas neste período, teriam a mesma probabilidade de ocorrência.

- **Preços de pico:**

O tamanho e a quantidade de picos utilizados na simulação variam de acordo com os valores históricos de máximo e mínimo obtidos durante cada mês dos seis anos em questão. A seleção da quantidade e do tamanho dos picos fez-se em duas etapas.

Na 1ª Etapa variou-se aleatoriamente, para cada mês em análise, a quantidade de picos entre a quantidade mínima e máxima de picos obtidos em cada mês dos 6 anos em estudo segundo a tabela 5, que apresenta a quantidade de picos obtida a partir da extração dos preços a vista da eletricidade com amplitude maior ou igual a duas vezes o nível de reversão à média do mercado NSW nos 6 anos de análise. Tomando como exemplo o mês de janeiro, fez-se variar a quantidade de picos entre o valor mínimo e valor máximo obtido nos 6 anos, que no caso foi de 24 e 126 respectivamente. Desta forma, todos os valores inteiros dentro deste intervalo possuem a mesma probabilidade de ocorrência ao se utilizar a função excel “aleatórioentre (24;126)”.

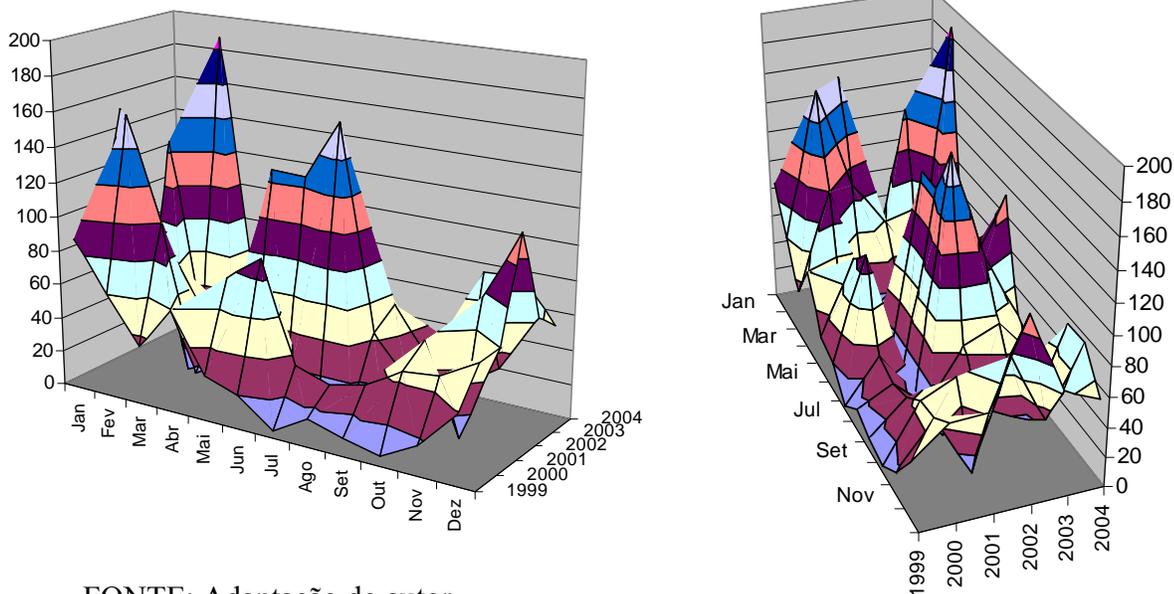
TABELA 5 - Quantidade de picos extraídos do mercado NSW para 6 anos.

Quantidade de picos do mercado NSW							
QT	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Média
Jan	89	91	155	24	126	118	101
Fev	60	159	90	59	18	187	96
Mar	34	100	6	26	27	44	40
Abr	59	16	14	35	4	60	31
Mai	26	76	1	127	46	78	59
Jun	20	91	1	126	69	113	70
Jul	4	34	0	160	86	43	55
Ago	16	28	8	44	54	30	30
Set	10	33	1	20	27	31	20
Out	6	45	55	26	15	75	37
Nov	17	47	5	77	30	76	42
Dez	39	59	60	117	63	52	65
Total	380	779	396	841	565	907	645

FONTE: Adaptação do autor

A tabela 5 pode ser melhor analisada através do gráfico 18, onde se pode fazer uma análise visual da quantidade de picos ao longo dos 12 meses dos 6 anos em questão. Verifica-se também que para o mercado NSW os picos de preço de energia estão concentrados nos meses de verão (Dez, Jan, Fev) e inverno (Mai, Jun, Jul)

GRÁFICO 18 – Quantidade de Preços de pico no mercado NSW entre os anos 1999 à 2004.



FONTE: Adaptação do autor

Na 2ª Etapa variou-se aleatoriamente, para cada mês, a amplitude dos picos entre a amplitude mínima ($\kappa = 2$) e a amplitude máxima dos picos ($\kappa + \delta$) obtidos ao longo dos 6 anos. Esta variação é conseguida a partir da utilização de um desvio padrão aleatório ($\delta \epsilon_{2t}$) cujo formato é modelado pela variável ϵ_{2t} conforme histograma de pico extraído do mercado NSW (gráfico 8b).

TABELA 6 – Amplitude máxima e média dos picos extraídos do mercado NSW para 6 anos

a) Tamanho médio dos picos do mercado NSW								b) Tamanho máximo dos picos do mercado NSW							
QT	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Média	QT	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Média
Jan	2,9	3,2	8,9	2,6	11,5	3,8	5,5	Jan	15,2	13,6	124,5	4,0	183,3	17,6	59,7
Fev	2,8	7,0	2,7	4,5	2,2	9,6	4,8	Fev	7,1	120,9	20,2	11,5	2,8	80,9	40,6
Mar	2,4	2,7	2,2	3,1	2,3	63,4	12,7	Mar	4,6	12,3	2,8	7,0	4,3	408,7	73,3
Abr	3,2	2,4	2,4	3,0	2,5	2,9	2,7	Abr	15,9	4,2	3,1	11,6	3,3	7,8	7,6
Mai	2,1	6,2	2,1	17,2	3,2	2,8	5,6	Mai	2,9	74,0	2,2	197,9	12,4	9,9	49,9
Jun	3,1	2,9	2,1	15,1	26,2	3,2	8,8	Jun	10,7	9,8	2,2	250,0	353,8	11,1	106,3
Jul	2,4	2,2		7,4	24,2	15,7	10,4	Jul	3,0	3,7		103,1	417,6	154,9	136,4
Ago	9,9	14,6	30,5	2,8	3,0	2,6	10,6	Ago	126,6	83,5	166,0	4,1	161,8	3,5	90,9
Set	6,5	8,2	2,2	5,2	8,3	2,5	5,5	Set	44,3	90,5	2,3	56,9	8,3	4,3	34,4
Out	2,2	2,4	2,8	2,4	2,3	19,2	5,2	Out	2,7	4,2	4,5	3,4	3,2	131,8	25,0
Nov	2,5	8,5	2,2	8,3	2,8	5,8	5,0	Nov	3,1	112,7	2,4	133,7	4,9	226,6	80,6
Dez	2,5	3,1	7,0	5,7	2,9	53,6	12,5	Dez	3,5	11,7	70,9	87,1	4,4	333,2	85,1
Média	3,5	5,3	5,9	6,4	7,6	15,4	7,4	Média	20,0	45,1	36,5	72,5	96,7	115,9	65,8

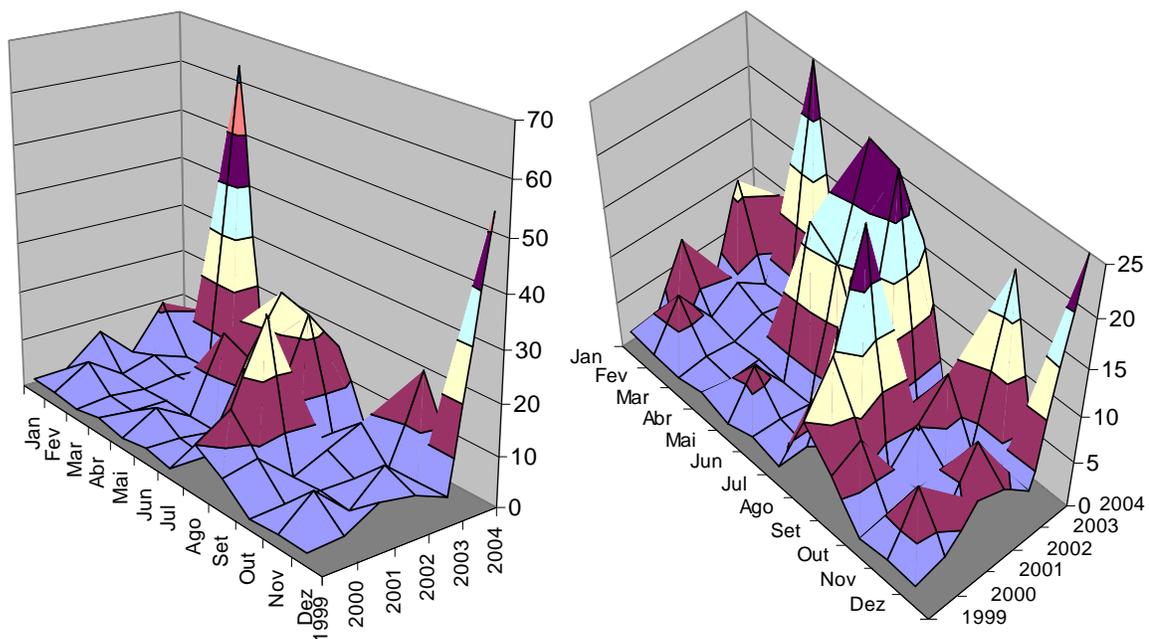
FONTE: Adaptação do autor

A Tabela 6 apresenta a amplitude máxima e média dos picos (quantidade de vezes > Nível de reversão à média) do mercado NSW nos 6 anos de análise, obtida a partir da extração dos preços a vista da eletricidade. Tomando como exemplo a tabela 5b para o mês de janeiro, fez-se variar a amplitude dos picos entre o valor mínimo ($\kappa = 2$) e o valor máximo obtido nos 6 anos, que no caso foi de 183,3. Desta forma, todos os valores inteiros dentro deste intervalo têm a uma probabilidade de ocorrência determinada pela calibração da variável ϵ_{2t} , que será explicada adiante.

Para o mercado NSW verifica-se que o tamanho dos picos possui uma certa correlação com a quantidade de picos, ou seja, quanto maior a quantidade de picos em um determinado período, maior o seu tamanho.

Uma exceção que se pode perceber claramente é no mês de agosto de 2000, onde se nota uma elevação significativa na amplitude dos picos enquanto a quantidade dos mesmos é baixa. Isso pode ter sido causado por um evento pontualmente localizado neste mês.

GRÁFICO 19 – Amplitude média dos preços de pico no mercado NSW entre os anos 1999 à 2004



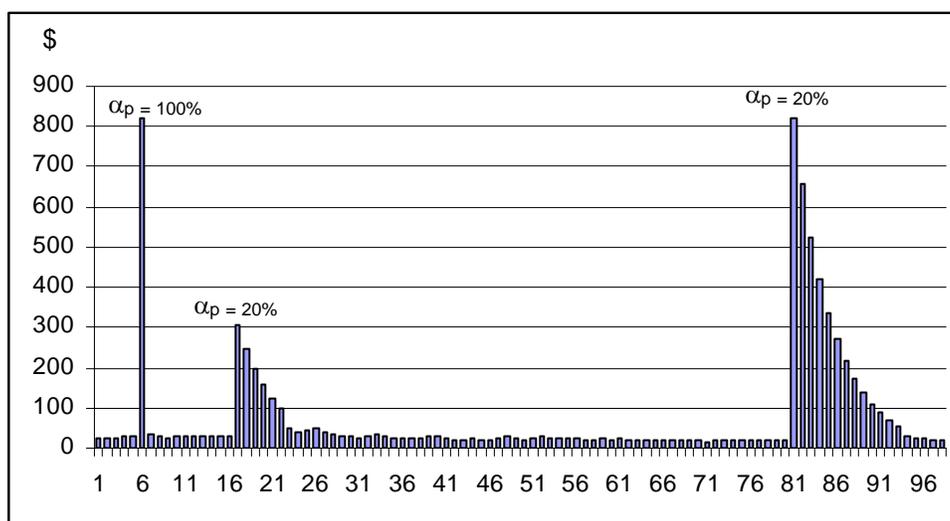
FONTE: Adaptação do autor

No Gráfico 19 – A amplitude média é calculada como quantidade de vezes que o preço de pico é maior que a curva de reversão à média. São usadas duas escalas diferentes para que se possa visualizar o tamanho dos picos menores.

Conforme exposto anteriormente, a velocidade de reversão para os preços de pico são bem mais elevadas que a velocidade de reversão para preços que não são pico, desta forma um novo parâmetro para o regime de saltos deve ser considerado, de forma que se possa regredir os preços de pico à uma taxa mais elevada que a razão de reversão à média α . Baseado nesta conclusão, foi introduzido o parâmetro α_p , que foi chamado de razão de reversão de pico. Este novo parâmetro irá determinar a velocidade com que os picos irão regredir de amplitude. Por simplificação em nosso estudo calibrou-se α_p com um valor de 100%, de forma que todo pico que ocorra retornará ao nível zero no instante seguinte. Este não é sempre o comportamento dos

preços de pico da energia elétrica, pois os picos podem demorar mais de um intervalo de tempo para retornarem aos níveis de custos de produção. A adoção de $\alpha_p = 100\%$, se dá para uma simplificação do simulador, pois caso utilizássemos valores abaixo deste (20% por exemplo - gráfico 20), teríamos uma reversão mais lenta dos valores de pico, que dependeria não somente do nível de reversão, como também da amplitude do pico. Isto faria com que houvesse uma disseminação de picos por vários intervalos consecutivos, elevando desta forma a quantidade de picos para um valor acima do percentual que havia sido calibrado para a simulação.

GRÁFICO 20 – Comparação entre diferentes razões de reversão de pico



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 20 resume o explicado acima, mostrando que apesar de se calibrar o simulador com um η para se obter 3 picos em cem intervalos, a velocidade de reversão de pico utilizada, $\alpha_p = 20\%$ para os dois últimos picos, faz com que os mesmos se difundam ao longo da curva de preço, gerando 5 picos a mais para o segundo pico e 11 picos a mais para o terceiro pico. Isto acontece devido aos picos não regredirem de imediato para o nível zero conforme aconteceu com o primeiro pico onde $\alpha_p = 100\%$, gerando desta forma picos extras e mascarando a calibração.

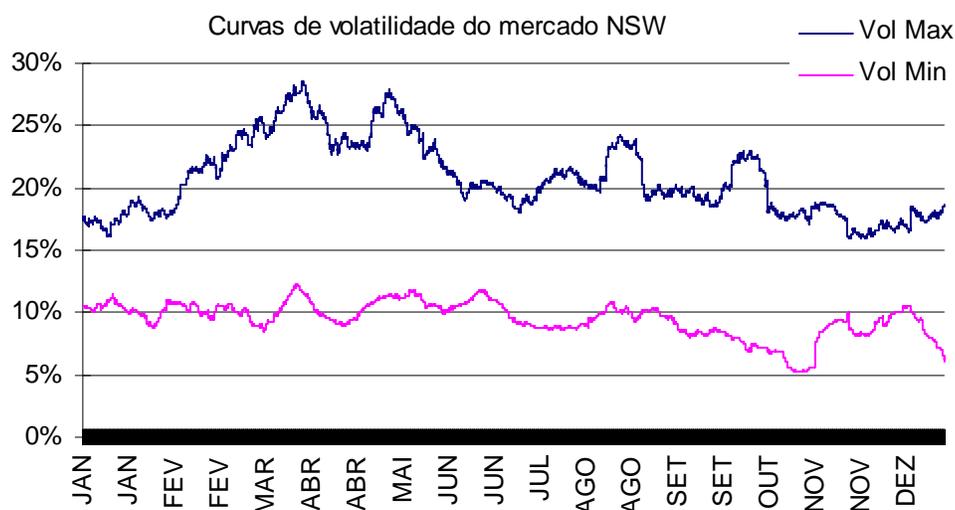
Uma solução para este caso seria criar tabelas de conversão ou funções, que levassem em consideração o parâmetro α_p , δ , e % picos que contabilizassem a quantidade de picos que seriam introduzidos em intervalos subsequentes quando da utilização de índices de reversão de pico

menores que 100%. Pode-se conseguir ajustes que eliminem estes efeitos no simulador, porém a construção de um simulador perfeito não é o intuito deste trabalho.

- **Volatilidade:**

A volatilidade utilizada como parâmetro de calibração do simulador varia aleatoriamente para cada mês de acordo com os valores históricos de volatilidade de máximo e mínimo obtidos nos 6 anos (gráfico 21), onde todos os valores com duas decimais, dentro do intervalo escolhido, têm a mesma probabilidade de ocorrência ao se utilizar a função excel “aleatório entre (mín;max)”.

GRÁFICO 21 – Curvas da volatilidade máxima e mínima do mercado NSW entre os anos 1999 e 2004.



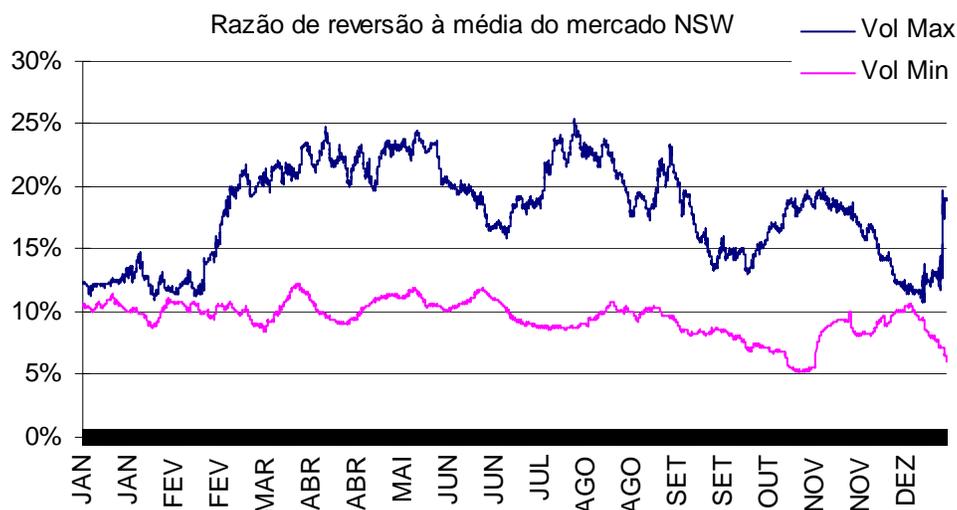
FONTE: Adaptação do autor

Os valores de volatilidade máximo e mínimo utilizados para a calibração mensal do simulador, podem ser observados a partir do Gráfico 21.

- **Velocidade ou razão de reversão à média:**

Este parâmetro é calibrado de forma a variar aleatoriamente de acordo com os valores históricos de razão de reversão à média de máximo e mínimo obtidos nos 6 anos Gráfico 22, onde todos os valores com duas decimais, dentro do intervalo escolhido, têm a mesma probabilidade de ocorrência ao se utilizar a função excel “aleatórioentre (mín;max)”.

GRÁFICO 22 – Curvas velocidade de reversão à média máxima e mínima do mercado NSW - anos 1999 a 2004.



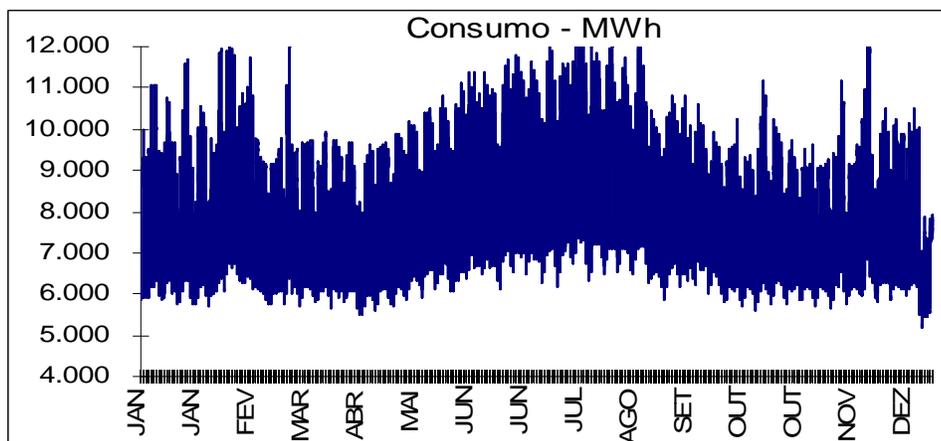
FONTE: Adaptação do autor

Os valores de volatilidade máxima e mínima utilizados para a calibração mensal do simulador, podem ser observados a partir do Gráfico 22.

- **Consumo:**

O consumo utilizado na simulação foi o consumo do último ano (2004) com uma taxa de crescimento aleatória baseada no crescimento dos últimos 5 anos. O nível de consumo oscila de acordo com o crescimento aleatório “sorteado”, cujos valores variam desde a taxa máxima de crescimento do consumo, observada ao longo dos 6 anos, até a taxa mínima de crescimento (gráfico 24). A probabilidade de obtenção de cada uma das taxas é distribuída igualmente entre cada valor com duas decimais através da utilização da fórmula da planilha excel “aleatórioentre (max;min)”.

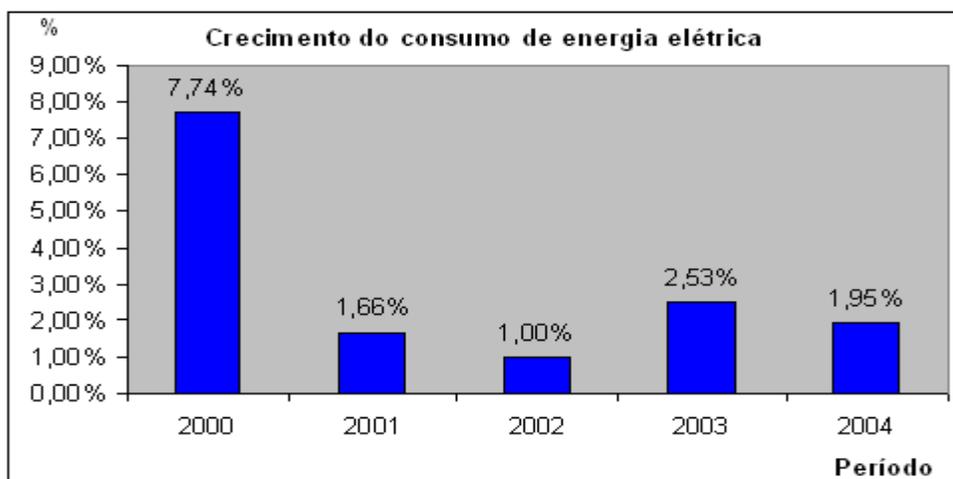
GRÁFICO 23– Consumo de energia elétrica no mercado NSW no ano de 2004



FONTE: Adaptação do autor

O consumo de energia assume o formato da curva do gráfico 23, porém com uma variação aleatória em suas amplitudes baseada na taxa de crescimento “sorteada”.

GRÁFICO 24 – Crescimento do consumo de energia elétrica no mercado NSW entre os anos 2000 e 2004.



FONTE: Adaptação do autor

O gráfico 24 mostra as taxas de crescimento do consumo da energia elétrica no mercado australiano NSW entre os anos 2000 e 2004. Verifica-se que existe uma tendência de crescimento contínuo, porém não homogênea. Desta forma, na simulação efetuada, foi considerado que qualquer valor entre a taxa de crescimento máxima e mínima, obtidas neste período, teriam a mesma probabilidade de ocorrência.

- **Parâmetros ϵ_1 e ϵ_2**

Estes parâmetros são variáveis aleatórias entre -1 e 1 com média zero, calibrados de forma a se obter as mesmas variações e desvios padrões dos preços a vista no mercado australiano, onde ϵ_1 calibra a componente de difusão e ϵ_2 calibra a componente de pico.

Segundo Blanco (2004) estas variáveis aleatórias possuem uma distribuição normal para os saltos e para a volatilidade.

Esta observação pode ser comprovada através do gráfico 8b, que apresenta o histograma de pico do mercado NSW para o ano 2000. Este histograma só é possível de se conseguir, utilizando valores aleatórios de ϵ_2 que faça com que os preços de pico obtidos se concentrem em

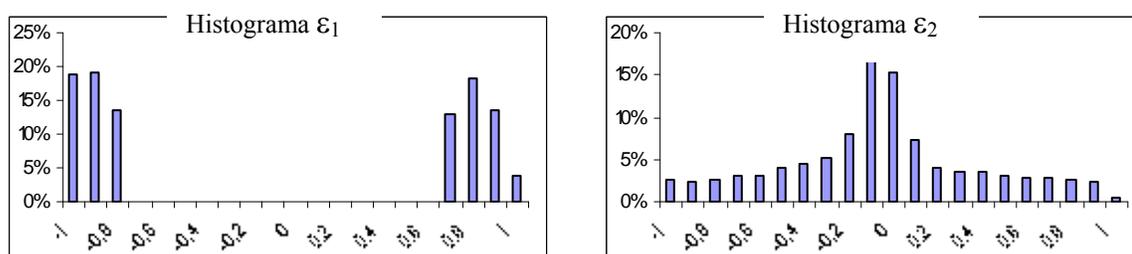
sua grande maioria no início da escala (amplitudes pequenas), porém tenha uma distribuição, com baixa frequência, em amplitudes mais elevadas.

A variável aleatória ϵ_2 não é um parâmetro de fácil extração, por isso sua introdução no simulador foi feita de forma comparativa com o histograma de pico obtido da curva real de preços de pico. Isso foi possível variando-se ϵ_2 através de dois novos parâmetros de calibração, Afastamento e Desvio padrão, para que se pudesse obter um histograma que se equiparasse ao extraído do mercado real:

Afastamento: Indica o quão distante do centro (valor zero) estão os valores aleatórios, cujas amplitudes de calibração variam de 0% a 100%.

Desvio padrão: Indica o desvio padrão (com relação ao centro) da amostra, cujo valor de calibração está entre 0% e 100%.

GRÁFICO 25 – Exemplo de calibração das variáveis aleatórias ϵ_1 e ϵ_2 .



FONTE: Adaptação do autor

O Gráfico 25 apresenta os parâmetros ϵ_1 e ϵ_2 calibrados através dos parâmetros afastamento 90% e 10% e desvio padrão 60% e 42% respectivamente. Para gerar um histograma de pico com as características do gráfico 8b, deve-se considerar para ϵ_2 um afastamento mínimo e um desvio padrão mais elevado.

A utilização de valores de $\epsilon_2 < 0$ é para garantir que sua média seja igual a zero e que o valor médio flutue em torno de seu valor base (no caso $\kappa = 2$). No entanto valores de pico só são considerados como tal, quando $S(t) \geq \kappa S^*$, além disso a utilização de $\epsilon_2 < 0$, dá a possibilidade de se obter valores negativos de pico, o que no mercado de eletricidade não é observado. Para contornar este problema, decidiu-se trabalhar os valores negativos de $(\kappa + \delta\epsilon_2)$ de forma que os

mesmo retornassem valores que são observados em maior quantidades no mercado NSW. No caso são (κ , $\kappa+1$, $\kappa+2$): $\kappa = 60\%$; $\kappa+1 = 28\%$; $\kappa+2 = 12\%$.

Da mesma forma que ϵ_2 a variável aleatória ϵ_1 é também um parâmetro de difícil extração. Os valores de volatilidade geralmente são elevados e não apresentam sinais de flutuações extremas ao longo do ano, por isso para a calibração de ϵ_1 deve-se levar em consideração valores que mantenham a volatilidade dentro de um patamar limitado. Considere por exemplo que a volatilidade de um determinado período seja um valor constante $\sigma = 30\%$; Para que pudéssemos manter este valor dentro deste patamar em uma simulação, a calibração deveria contemplar apenas os valores -1 e +1 para o parâmetro ϵ_1 , de forma que a volatilidade total $\sigma\epsilon_1$ seja 30% ou -30%. Para se conseguir este efeito na calibração deve-se utilizar um afastamento máximo de 100%.

Baseado nestes fatos, conclui-se que os valores de ϵ_1 devem ser calibrados com um afastamento elevado e baixo desvio padrão.

6.2.2 - Construção do simulador

Após a definição dos parâmetros que serão utilizados na simulação, construiu-se um simulador para a obtenção dos preços a vista de energia elétrica, valor da opção e cenários.

Utilizando-se a fórmula do modelo “Regime Switching” tem-se:

$$S_{t+1} = \left\{ S_{t(r)} + \alpha(S^* - S_{t(r)}) + S_{t(r)} \sigma \epsilon_{1t} \right\} \text{ ou } \left\{ -\alpha_p S_{t(p)} + \eta [S^* (\kappa + \delta \epsilon_{2t})] \right\}$$

$S_{t(r)}$: Preço a vista do regime de reversão no instante t

$S_{t(p)}$: Preço a vista do regime de pico no instante t

S^* : Nível de reversão à média

α : Velocidade de reversão à média

α_p : Velocidade de reversão de pico

σ : Nível de difusão

η : Possibilidade de ocorrência de um pico, cujo valor é 1 ou 0. A probabilidade é extraída dos 6 anos em estudo do mercado NSW conforme definido no item 7.2.1 (preços de pico).

Tamanho dos picos: $E[\text{Spike}]/S^*$

ε_{1t} ε_{2t} : São valores de aleatórios com distribuição normal, cujo valor médio é zero, podendo assumir valores positivos e negativos entre -1 e 1 , cujo desvio padrão é escolhido de acordo com a probabilidade de ocorrência dos picos mais elevados.

Componente de reversão $CR = \alpha(S^* - S_t)$

Componente de difusão $CD = S_t(r) \sigma \varepsilon_{1t}$

Componente de salto $CP = -\alpha_p S_t(p) + \eta [S^* (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})] \}$

Componente de reversão de salto $Cr_p = -\alpha_p S_t(p)$

$S_{t+1}(r) = S_t(r) + CR + CD$ (Valor do preço a vista no regime de reversão à média).

$S_{t+1}(p) = S_t(p) + CP$ (Valor do preço a vista no regime de pico).

$S_{t+1} = S_{t+1}(r)$ ou $S_{t+1}(p)$

O valor de S_{t+1} é obtido através da alternância dos dois regimes, onde a probabilidade de ocorrência do regime de pico é a probabilidade dos preços de pico ocorrerem. O simulador foi calibrado de tal forma, que quando um pico é detectado, o regime é automaticamente trocado para o regime de pico, voltando ao regime de reversão à média quando o valor do pico alcançar o nível de difusão superior, ou seja, quando atingir a fronteira onde a difusão está ocorrendo. O tempo de retorno ao regime de reversão dependerá da razão de reversão de pico α_p (ou razão de reversão aos níveis de difusão).

Se $S_{t+1}(p) > \text{Max}\{S_{t+1}(r)\}$ Regime de pico.

Se $S_{t+1}(p) < \text{Max}\{S_{t+1}(r)\}$ Regime de reversão à média.

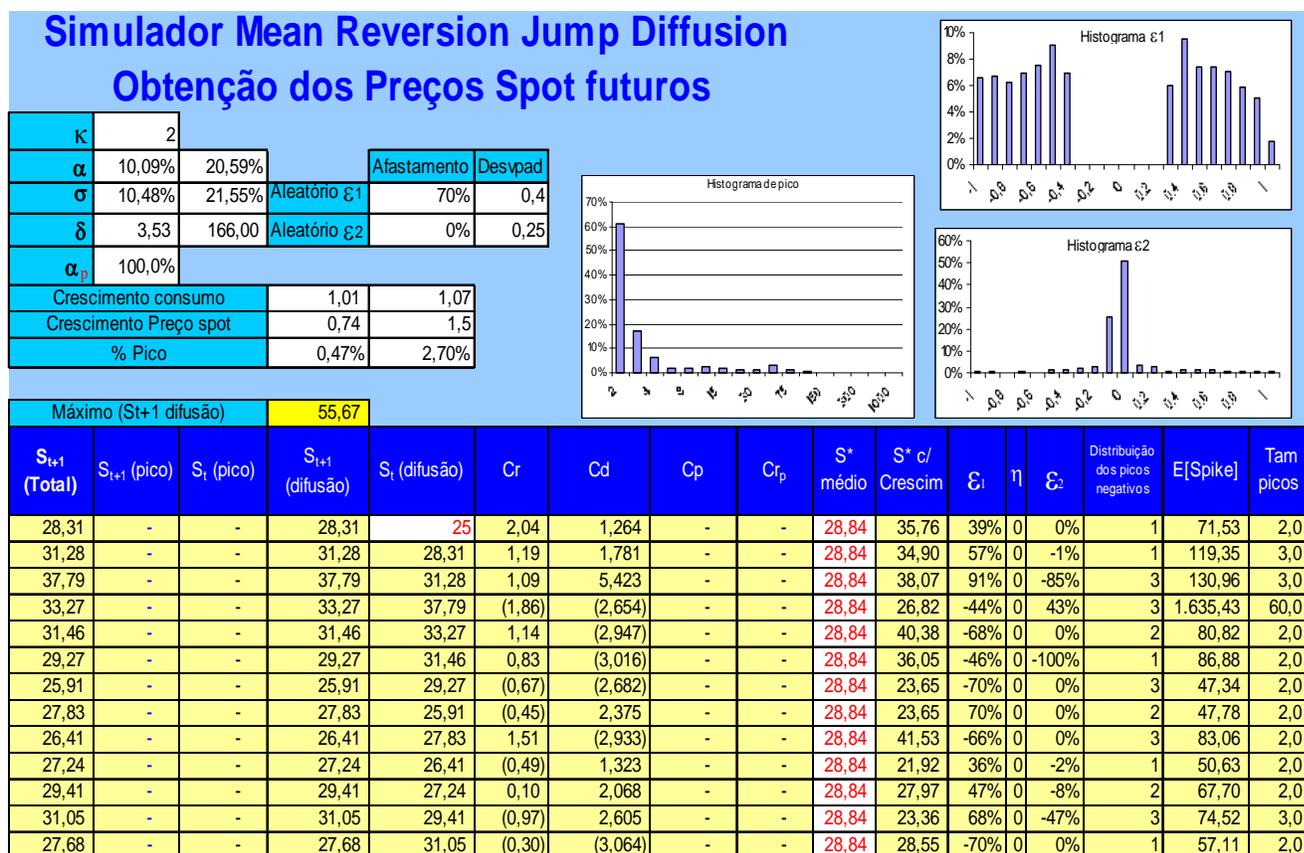
- **Modelagem dos preços da energia elétrica**

Na planilha excel, primeiro define-se um valor inicial de $S(t)$, que poderá ser qualquer um, pois devido à reversão à média este valor tenderá ao nível de longo prazo. Depois referencia-se o próximo valor de $S(t)$ como sendo o valor de $S(t+1)$ no instante anterior.

A figura 5 apresenta parte da planilha elaborada para a modelagem dos preços a vista da energia elétrica. As células marcadas em branco são os dados de entrada S_t , α (máximo e mínimo mensal), σ (máximo e mínimo mensal), δ (máximo e mínimo mensal), α_p , crescimento do consumo (máximo e mínimo anual), crescimento da curva de reversão (máximo e mínimo anual),

% pico (máximo e mínimo mensal), preços da curva de reversão à média a cada 30 minutos (informação de um mês completo -1440 dados) ε_1 e ε_2 (calibrados com os parâmetros afastamento e desvio padrão). Cada linha da planilha representa 30 minutos de informação, de forma que existem 1440 linhas para completar a análise de um mês.

FIGURA 5 – Planilha para modelagem dos preços a vista da eletricidade.

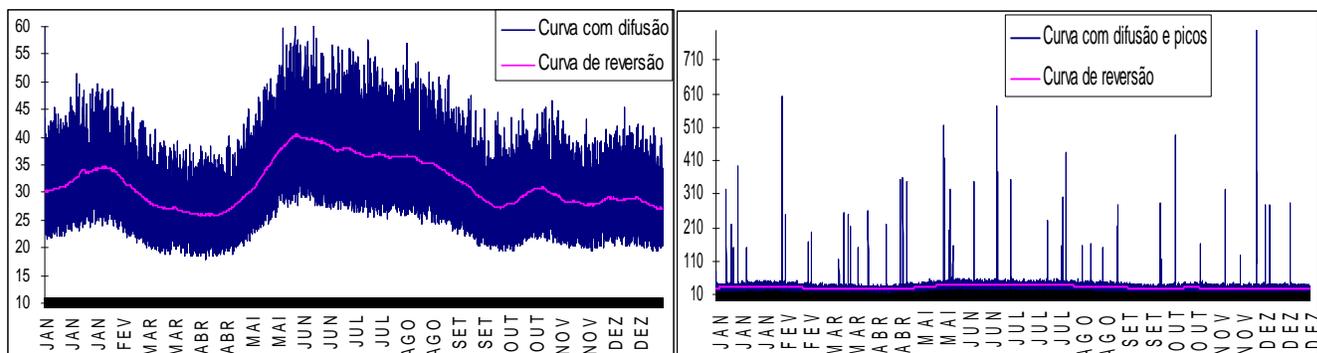


FONTE: Adaptação do autor

A modelagem dos preços a vista é feita automaticamente na planilha excel devido à existência de variáveis aleatórias, bastando apertar a tecla DEL.

O gráfico 26 mostra a modelagem de duas curvas de preços de eletricidade editadas sem picos e com picos. A curva de reversão à média utilizada é a do mercado NSW ano 2000, que pode ser observada em vermelho centrada na curva total de preços. Os outros parâmetros utilizados foram $\alpha = 13\%$, $\sigma = 10\%$ e para a curva com picos, $\kappa = 2$ e $\delta = 25$.

GRÁFICO 26 - Curvas de preço modeladas para o mercado NSW



FONTE: Adaptação do autor

- **Simulador para precificação de opções de compra**

A simulação de precificação da opção de compra feita através de planilha excel utiliza todos os parâmetros ingressados para a modelagem do preço de energia elétrica (editados nas células em verde claro), os resultados das curvas de preço modeladas (S_{t+1} pico, S_{t+1} difusão e S_{t+1} total) e mais três parâmetros:

Preço de exercício: valor que se pagará caso o preço a vista da eletricidade seja maior que este.

Proteção: Quantidade de MWh contratados por dia para ser utilizado caso o preços da eletricidade seja maior que o preço de exercício contratado (Strike).

r: Taxa livre de risco do mercado australiano, cujo valor atual é de 4%.

FIGURA 6 - Planilha de cálculo do preço da opção de compra.

Simulador Mean Reversion Jump Diffusion										Cálculo da opção					
Média			κ		α		σ		δ		Proteção	Vr. Opção			Simular Preço Opção
Call _{Final}	Call _P	Call _R	2	1%	2%	20,0%	25,0%	4	250	r (anual)	15.000	2,32			
19,32	235,13	4,25									Strike	100			Otimizar opção
										% pico	6,53%				
Call _{Final}	Call _P	Call _R	S _{t+1} (Total)	S _{t+1} (pico)	S _{t+1} (difusão)	S*	ε _S	E[Spike]	d'	d	Vol	r (diário)	t		
0,00	-	0,00	22,29	-	22,29	27,11	0,000	54,23	(1.257)	(3,44)	0,41	0,000%	1		
62,88	963,46	-	19,26	-	19,26	34,03	0,185	963,57	9	(15,07)	0,11	0,011%	1		
9,24	141,62	-	251,48	251,48	22,95	31,44	0,032	252,25	0	9,36	0,10	0,011%	1		
54,94	98,57	51,90	142,01	106,42	142,01	35,47	2%	134,22	2	2,11	0,12	0,022%	2		
56,37	-	60,30	149,88	-	149,88	23,65	0%	78,75	540	2,42	0,12	0,022%	2		
71,56	-	76,56	165,07	-	165,07	33,45	0%	114,75	(8)	2,98	0,12	0,022%	2		
-	-	-	25,14	-	25,14	28,26	0%	56,57	(1.234)	(34,70)	0,01	0,327%	30		
39,76	609,18	-	21,28	-	21,28	24,23	56%	672,05	72	(68,48)	0,00	0,327%	30		
-	-	-	23,61	-	23,61	21,34	0%	42,72	(440)	(16,76)	0,02	0,327%	30		

FONTE: Adaptação do autor

A figura 6 mostra a planilha de cálculo do preço da opção. Células em verde claro representam os dados de entrada κ , α , σ , δ , Strike (preço de exercício), r (taxa livre de risco). As células em amarelo são os resultados obtidos da simulação; % pico, Prêmios Opção_{tot}, Opção_{pico} e Opção_{rev} cujo valor é obtido através da média de dos 1440 intervalos de 30 minutos do mês. Além dos parâmetros e resultados da modelagem, são utilizadas na planilha para o cálculo da opção, todas as variáveis da equação do capítulo 4.

$$\text{Opção} = \% \text{pico} \cdot \text{Opção}_P + (1 - \% \text{pico}) \cdot \text{Opção}_R$$

$$\text{Opção}_R = \text{Opção} \left[t, K, \frac{S_{Rt}}{(1 - \% \text{pico})_t}, \text{Vol}_t \right]$$

$$\text{Opção}_P = \exp(-rt) \cdot \{ E[\text{Pico}] N(d') - KN(d' - \sigma_p) \}$$

Opção_r: Preço da opção no regime de reversão à média

Opção_p: Preço da opção no regime de pico

S_{Rt}: Preço a vista do regime de reversão à média

%pico: Probabilidade de ocorrência de pico

Vol: Volatilidade dos prêmios da opção no regime de reversão à média

r : Taxa livre de risco

t : tempo em dias

E[Pico]: Valor esperado de pico $S^* (\kappa + \delta \varepsilon_{2t})$

N : Normal

K – Strike – Preço de exercício

$\delta \varepsilon_{2t}$: desvio padrão aleatório de pico

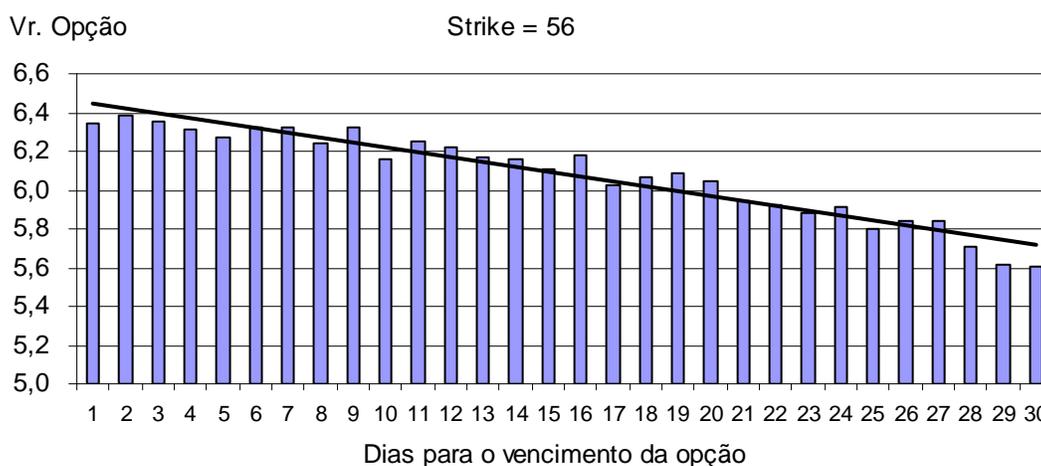
$$d' = \frac{\ln \left[\frac{E[\text{Pico}]}{K} \right] + \frac{1}{2} (\sigma_p)^2}{\sigma_p}$$

O simulador utiliza o modelo de opção diária e parte do princípio que as negociações são efetuadas para vencer 21 dias após a negociação, ou seja, a cada dia faz-se uma negociação de opção cujo exercício está programado para 3 semanas adiante e cujo valor do prêmio é obtido através de uma média dos prêmios dos 48 intervalos de 30 minutos de cada dia.

O prêmio da opção é obtido através de várias simulações com os parâmetros de entrada, de forma a se obter como resultado final uma média dos valores obtidos em todas as simulações para cálculo da opção total. Este valor é então utilizado como o valor do prêmio da opção para a simulação de cenários e verificação da efetividade da opção escolhida .

Como exemplo de valores de opção diária plotou-se os valores dos prêmios da opção para 30 vencimentos consecutivos, cuja negociação foi efetuada em um mesmo dia. Pode-se observar no gráfico 27 os valores obtidos para o mês de janeiro, onde foi utilizado o modelo de alternância de regimes de reversão à média e de saltos com os parâmetros extraídos dos 6 últimos meses de janeiro do mercado australiano NSW.

GRÁFICO 27 - Valor do prêmio da opção em diferentes vencimentos



FONTE: Adaptação do autor

- **Obtenção de cenários**

A partir do valor da opção de compra obtido na simulação, é necessário gerar cenários de preços a vista de eletricidade de forma a se obter os valores de custo com compra de eletricidade com e sem utilização de hedge. Deve-se também definir a quantidade de energia em MWh (proteção), que se quer adquirir (proteger) diariamente. Com estes parâmetros ingressados, fez-se várias simulações de cenários para que se pudesse vislumbrar os ganhos/perdas e a quantidade de cenários positivos obtidos com a utilização da opção e proteção escolhidas.

A escolha do valor do Preço de exercício e a quantidade de proteção são imprescindíveis para que se possa maximizar o ganho e obter um maior quantitativo de cenários positivos. No

entanto esta maximização só é possível de se obter, simulando cenários para várias combinações de preço de exercício e proteção.

Na figura 7 é apresentada a planilha para simulação de cenários, onde são transportados o resultado do valor da opção com seu respectivo preço De exercício e a quantidade de proteção em MWh que devem ser adquiridos diariamente.

FIGURA 7 - Planilha para geração de cenários.

Simulador Mean Reversion Jump Diffusion							
Obtenção de cenários							
Strike	100	\$					
opção	3,49	\$					
Proteção	15.000	MWh/dia					
Cons médio	288.458	MWh/dia					
			Custo s/ proteção mensal \$		343.910.617		
			Custo c/ proteção mensal \$		265.337.983		
			Ganho mensal \$		78.572.634		
			Sobra diária MWh		11.996		
			Desvpad pico		845,0		
Dia do mês	Consumo último ano	Consumo c/ Crescim	Custo sem proteção	Custo com proteção	saldo devedor \$	Reserva dia KWh	Utilização
1	7.016	7.156	186.076	186.076	(52.351)	15.000	1
1	6.674	6.808	166.405	166.405	(52.351)	15.000	1
1	6.297	6.611	178.564	178.564	(52.351)	15.000	1
1	5.953	6.013	143.118	143.118	(52.351)	15.000	1

FONTE: Adantação do autor

Esta planilha apresenta também os resultados de custo com e sem proteção, o ganho/perda com a utilização da opção escolhida e a sobra total de energia não utilizada para a proteção.

O custo de “hedge” é obtido através da multiplicação da proteção (MWh) pelo preço da opção, onde este se torna um custo afundado, ou seja, independentemente dos cenários futuros, este valor já esta comprometido, utilizando a proteção ou não. O custo total de compra de energia com a utilização de opção de hedge é obtido da seguinte forma:

SE Preço a vista \geq Preço de exercício

ENTÃO

SE Reserva dia \geq Consumo 30min

ENTÃO

Custo = Consumo x Preço de exercício

SENÃO (reserva dia < Consumo 30 min)

Custo = (Consumo 30 min - reserva dia)x Preço a vista + reserva dia x

Preço de exercício

SENÃO (Preço a vista < Preço de exercício)

Custo = Consumo X Preço a vista

Para se obter o custo total com compra de energia para o período de um dia, deve-se somar os custos dos 48 intervalos de meia hora deste dia e adicionar o custo com a compra do prêmio para a proteção requerida para aquele dia.

$$\text{Custo total} = \sum_{t=1}^{t=48} \{ \text{Preço de exercício} \times \pi(t) \text{ Consumo}(t) + \text{Preço a vista}(t) \times [1 - \pi(t)] \text{ Consumo}(t) \} + \text{Prêmio opção} \times \text{Proteção diária.}$$

Onde: π é o percentual de utilização da opção ao preço de exercício em cada instante t de 30 minutos.

As células em amarelo da figura 7, são os resultados obtidos para uma simulação: custo de compra de energia com e sem proteção, ganho mensal com compra de energia com proteção, sobra diária de energia contratada como proteção e desvio padrão dos picos simulados.

Considerou-se que a opção comprada para um determinado dia e conseqüentemente sua quantidade de proteção em MWh vence neste mesmo dia e pode ser acumulada e utilizada durante os 48 intervalos dentro do dia em questão. No entanto não pode ser utilizada em dias posteriores caso haja sobra de proteção, ou seja, quando não houver utilização total ou parcial da proteção contratada. A não utilização total ou parcial da proteção acontece devido aos preços a vista não terem ultrapassado o preço De exercício durante o dia, em quantidades suficientes para esgotar toda a proteção contratada. Esta sobra de proteção é então descartada e considerada como custo afundado.

O saldo devedor inicia o dia sempre negativo com um valor igual a Proteção diária versus o valor da opção. Este saldo vai regredindo (menos negativo) a medida que a proteção vai sendo utilizada, podendo chegar no máximo a zero quando da utilização total da proteção.

Da mesma forma a reserva de proteção inicia o dia sempre com a quantidade máxima de proteção adquirida para cada dia e vai sendo reduzida à medida que é utilizada para cobrir os preços a vista acima do preço de exercício.

6.3 – Simulação e Obtenção dos Resultados

Para obtenção dos resultados da simulação, precisa-se identificar qual a combinação preço de exercício, prêmio e proteção que gera o maior retorno e maior quantidade de cenários positivos.

A tabela 7 mostra simulações feitas para combinações de 7 preços de exercício e 7 quantidades de proteção, gerando um total de 49 resultados para o período de um mês (para cada mês foi utilizado os parâmetros de calibração obtidos no mercado NSW para os anos de 1999 à 2004). A data de negociação considerada para a simulação foi de 21 dias antes da data de vencimento, onde diariamente se faz uma cobertura para todos os dias do mês seguinte. Para esta primeira aproximação, cada um dos resultados foi gerado a partir da simulação de apenas 100 cenários distintos, de forma que pudéssemos ter uma filtragem macro de qual intervalo de valores deveríamos assumir para uma simulação mais detalhada (com mais cenários e valores mais centrados).

TABELA 7 – Levantamento do intervalo de maximização de retorno com utilização de opção.

	Strike	Proteção						
		150000	100000	75000	50000	30000	20000	10000
Cenário	20	51%	49%	54%	39%	38%	32%	31%
Sobra		763,57	-	-	-	-	-	-
Ganho		3.738.807,30	3.570.457,19	3.337.330,44	874.254,87	506.767,24	1.196.050,21	764.963,77
opção		17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25
Desvpad		448,57	503,52	491,91	533,15	503,36	541,21	470,41
% pico		3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%
Cenário	35	92%	100%	99%	100%	100%	100%	100%
Sobra		2.504.377,85	1.245.502,34	753.281,02	370.841,66	133.539,18	61.609,36	14.986,51
Ganho		36.142.977,80	41.054.082,93	39.720.541,59	37.117.147,90	32.216.695,06	26.168.039,67	20.222.034,14
opção		7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
Desvpad		528,35	516,72	500,04	521,13	498,19	482,38	517,08
% pico		3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%
Cenário	45	92%	97%	99%	100%	100%	100%	100%
Sobra		3.897.158,63	2.411.043,50	1.685.070,34	990.164,45	470.057,63	237.156,77	69.292,06
Ganho		34.244.295,79	45.997.529,34	48.297.973,46	50.913.035,23	50.533.112,95	49.368.141,38	34.152.286,32
opção		6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50
Desvpad		528,69	537,38	531,01	519,16	479,58	547,74	517,02
% pico		3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%
Cenário	55	93%	98%	98%	100%	100%	100%	100%
Sobra		4.204.761,77	2.706.025,58	1.950.656,11	1.197.953,09	616.867,73	345.647,43	110.221,56
Ganho		33.527.365,14	35.215.789,56	45.893.657,80	55.286.511,16	53.990.983,27	45.373.856,63	38.005.800,52
opção		6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07
Desvpad		521,38	466,51	523,36	544,90	521,37	485,28	514,97
% pico		3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%
Cenário	70	91%	94%	99%	99%	100%	100%	100%
Sobra		4.321.078,40	2.830.725,26	2.071.385,90	1.325.789,42	721.035,89	424.951,48	155.854,30
Ganho		30.243.968,83	35.638.585,20	42.115.449,37	46.332.537,74	48.291.170,06	49.521.749,51	43.724.637,32
opção		5,81	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81
Desvpad		527,93	515,30	500,26	523,41	499,01	505,60	528,49
% pico		3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%
Cenário	90	89%	96%	98%	100%	100%	100%	100%
Sobra		4.402.151,45	2.901.137,94	2.146.822,10	1.396.921,35	798.684,76	502.264,28	207.032,63
Ganho		27.948.351,63	32.984.797,90	38.385.602,89	41.100.020,85	45.565.099,93	47.491.325,33	50.536.282,84
opção		5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66
Desvpad		518,68	494,04	499,94	483,65	500,38	516,99	562,65
% pico		3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%
Cenário	110	81%	93%	97%	99%	100%	100%	100%
Sobra		4.421.538,70	2.923.614,60	2.174.294,49	1.421.168,49	824.318,31	523.113,42	227.094,11
Ganho		22.159.497,23	31.833.602,20	35.687.838,03	45.090.613,58	42.665.373,77	44.308.380,39	47.015.373,43
opção		5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82
Desvpad		486,62	514,55	501,02	529,60	503,59	496,13	544,07
% pico		3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%

FONTE: Adaptação do autor

Na tabela 7 verifica-se que o melhor cenário obtido para as simulações efetuadas está compreendida entre os valores preço de exercício de 45 a 70 e valores de proteção entre 75.000 MWh a 30.000 MWh, pois além ter-se obtido 100% de cenários positivos, obteve-se também o maior ganho dentro deste intervalo.

TABELA 8 - Levantamento dos valores finais de maximização de retorno com utilização de opção.

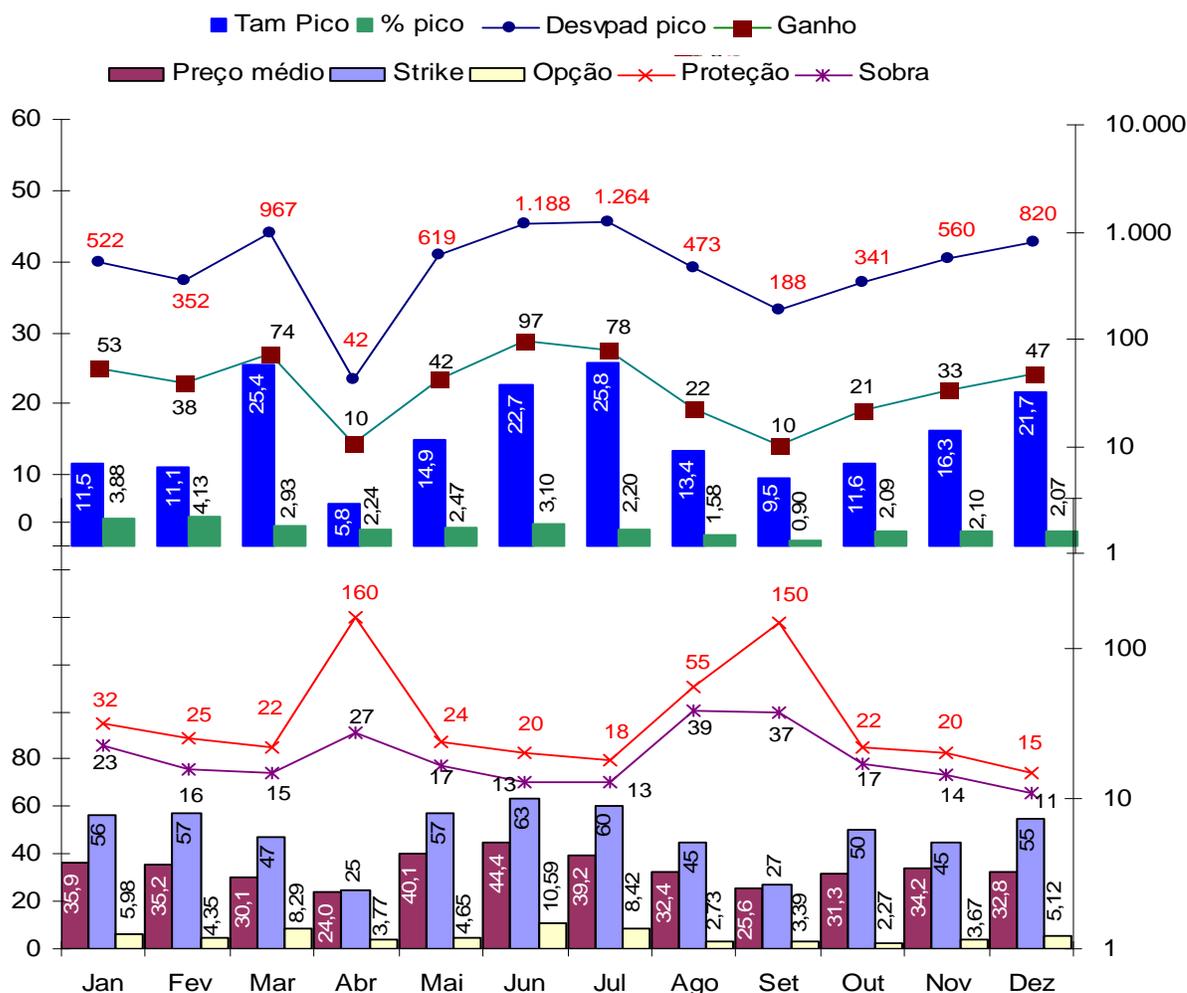
Strike	Proteção						
	32000	34000	36000	38000	40000	42000	44000
56	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	685.818,52	747.394,41	803.424,62	863.826,36	920.660,51	984.515,37	1.042.211,04
	53.055.245,56	51.765.396,42	50.266.215,31	50.263.090,76	50.637.866,55	48.843.866,79	49.708.791,23
	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98
	522,43	514,90	508,13	512,52	514,26	504,44	508,79
	3,880%	3,880%	3,880%	3,880%	3,880%	3,880%	3,880%

FONTE: Adaptação do autor

Em uma segunda e terceira etapas, repetiu-se a mesma simulação para obtenção de mais 49 resultados em cada uma das etapas, porém agora centrando os valores cada vez mais próximos dos valores de maximização, além disso aumentou-se as simulações para 500 cenários e 1000 cenários para a segunda e terceira etapas respectivamente. Com este refinamento obteve-se como resultado de maximização a tabela 8, onde preço de exercício = 56, proteção = 32.000 e 100% de chance de se obter cenários positivos com a utilização desta opção e proteção. Esta análise foi efetuada para cada um dos meses do mercado em questão, de forma a se obter os valores anuais maximizados para uma simulação de cenários finais. A proteção para todos os dias do mês é essencial, pois não se sabe quando as altas variações de preço vão ocorrer, e caso não se esteja protegido justamente em um dia em que houver variações mais intensas de preço (picos ou altas volatilidades de difusão), a proteção feita para o período estipulado poderá ter pouca ou nenhuma efetividade na contabilização geral.

Após a simulação para cada um dos meses do ano do mercado NSW, chegou-se aos resultados do gráfico 28, onde verificou-se que o mês com a combinação de maior probabilidade de pico com o maior desvio padrão de pico, geram a opção mais cara e a menor contratação de proteção, no entanto geram os ganhos mais elevados.

GRÁFICO 28 - Avaliação da aplicação de contratos de opção para todos os meses do mercado australiano NSW.

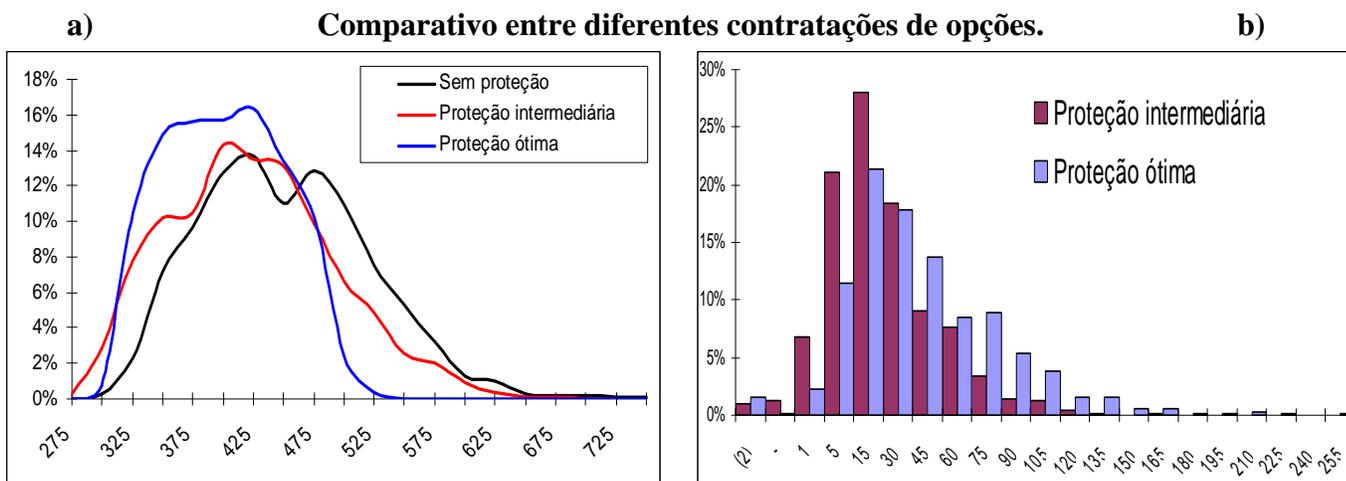


FONTE: Adaptação do autor

Percebe-se também que os meses com menor probabilidade de pico e baixo desvio padrão de pico, geram prêmios de opção mais baratos, porém exigem uma contratação maior de proteção e possuem um ganho mais baixo.

Nos gráficos 29a, verifica-se o formato do histograma de custo de compra de energia elétrica para diferentes opções e proteções como também sem a utilização de proteção. À medida que se utilizam proteções mais adequadas, os desvios padrões dos retornos esperados se estreitam e suas médias se tornam menores, significando obtenção de custos mais baixos com menor probabilidade de dispersão de preço.

GRÁFICO 29 - Avaliação da aplicação de contratos de opção em janeiro para o mercado NSW.



FONTE: Adaptação do autor

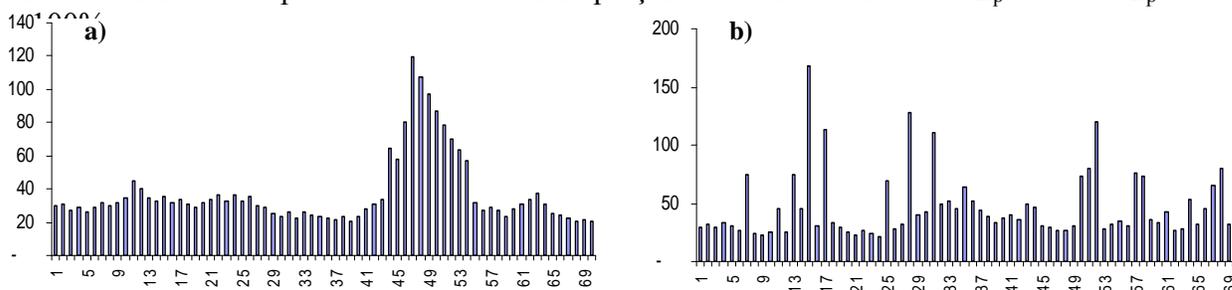
No gráfico 29a vemos três curvas simuladas para o mês de janeiro do Mercado NSW: sem proteção, com proteção por opção intermediária e com proteção maximizada da opção.

Observa-se um deslocamento da curva de probabilidade de preço em direção a um menor custo à medida que se aproxima da proteção ideal (a que dá maior probabilidade de cenários positivos e maior ganho). Percebe-se também no gráfico 29b que apesar da quantidade de cenários positivos permanecer o mesmo (já se está no limite de quase 100%) existe uma probabilidade de ganhos (economia) mais elevada quando da utilização de uma combinação ótima entre preço de exercício e proteção.

6.4 – Considerações sobre a simulação

Velocidade de reversão de pico α_p

Em cenários mais realistas onde a velocidade de reversão de pico é menor que 100%, os picos começam a aparecer de forma mais concentrada em um determinado período. Como a quantidade de picos para cada mês é extraída dos dados históricos, conclui-se que a calibração anteriormente efetuada deveria ser alterada, de forma que a geração de novos picos (picos de regressão) não aumentassem a quantidade para que o simulador foi calibrado (valor em que η é igual a 1). Para isso deve-se dimensionar o parâmetro η em conjunto com o parâmetro α_p , de forma que no final a quantidade de picos que apareçam sejam as mesmas da calibração desejada.

GRÁFICO 30 - Comparativo entre curvas de preços a vista simuladas com $\alpha_p = 20\%$ e α_p 

FONTE: Adaptação do autor

No gráfico 30 temos duas curvas de preço da eletricidade plotadas para 70 intervalos de tempo. Ambos os casos geram a mesma probabilidade de picos, no entanto os picos estão bem mais concentrados quando $\alpha_p = 20\%$ gráfico 30a, quando comparado com $\alpha_p = 100\%$ gráfico 30b.

Outra análise que se deve fazer desta modificação é que a utilização de opções e proteções devem ser recalculadas, pois apesar dos quantitativos de picos e os desvios padrão serem os mesmos, a ocorrência dos picos mudou consideravelmente. Para comprovar esta suposição, foram efetuadas algumas simulações utilizando um valor de reversão de pico com um valor extrapoladamente reduzido de 20%. No resultado da simulação de 1.000 cenários, apresentado na tabela 9, percebe-se que utilizando-se uma velocidade de reversão de pico baixa, a quantidade de cenários positivos, para um mesmo % de pico mensal, sofre uma redução. Também é menor a quantidade de proteção que se deve adquirir e menor o ganho com a utilização desta combinação.

TABELA 9 - Levantamento dos valores de maximização de retorno com utilização de opção em cenários com $\alpha_n = 20\%$.

	Strike	Proteção						
		20000	17000	15000	13000	10000	7000	5000
Cenário	45	87%	89%	86%	94%	93%	92%	93%
Sobra		348.490,34	290.593,17	249.025,44	208.011,84	151.740,56	99.591,69	69.775,51
Ganho		20.781.539,12	19.595.592,83	17.955.090,31	17.054.148,15	13.065.507,94	10.030.339,41	6.979.766,61
opção		4,29	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29
Desvpad		354,91	398,85	377,24	417,21	399,19	391,63	422,11
% pico	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	
Cenário	47	89%	89%	87%	90%	91%	96%	91%
Sobra		387.202,02	320.657,18	271.053,02	231.326,00	172.736,29	113.920,08	76.122,45
Ganho		21.148.360,78	18.625.517,09	18.850.271,71	14.764.685,82	12.486.486,36	11.046.051,57	7.977.570,95
opção		4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
Desvpad		352,21	366,57	396,66	383,25	399,19	430,85	415,45
% pico	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	
Cenário	50	88%	86%	89%	92%	92%	95%	93%
Sobra		428.358,87	352.424,15	309.329,26	255.333,85	191.677,48	129.403,81	92.040,82
Ganho		24.851.310,59	20.236.203,80	21.304.033,78	18.281.015,18	14.370.810,25	10.315.851,19	6.861.012,20
opção		3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
Desvpad		399,97	361,05	442,80	419,15	382,05	401,78	355,07
% pico	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	
Cenário	55	82%	88%	86%	89%	87%	93%	93%
Sobra		472.494,22	389.641,06	341.354,06	288.732,25	217.756,61	146.120,66	102.428,57
Ganho		20.506.226,42	20.833.049,87	19.116.001,26	17.169.346,72	12.886.326,19	10.132.058,52	7.399.593,82
opção		3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90
Desvpad		354,54	404,88	385,92	401,71	365,79	368,68	377,81
% pico	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	2,4%	

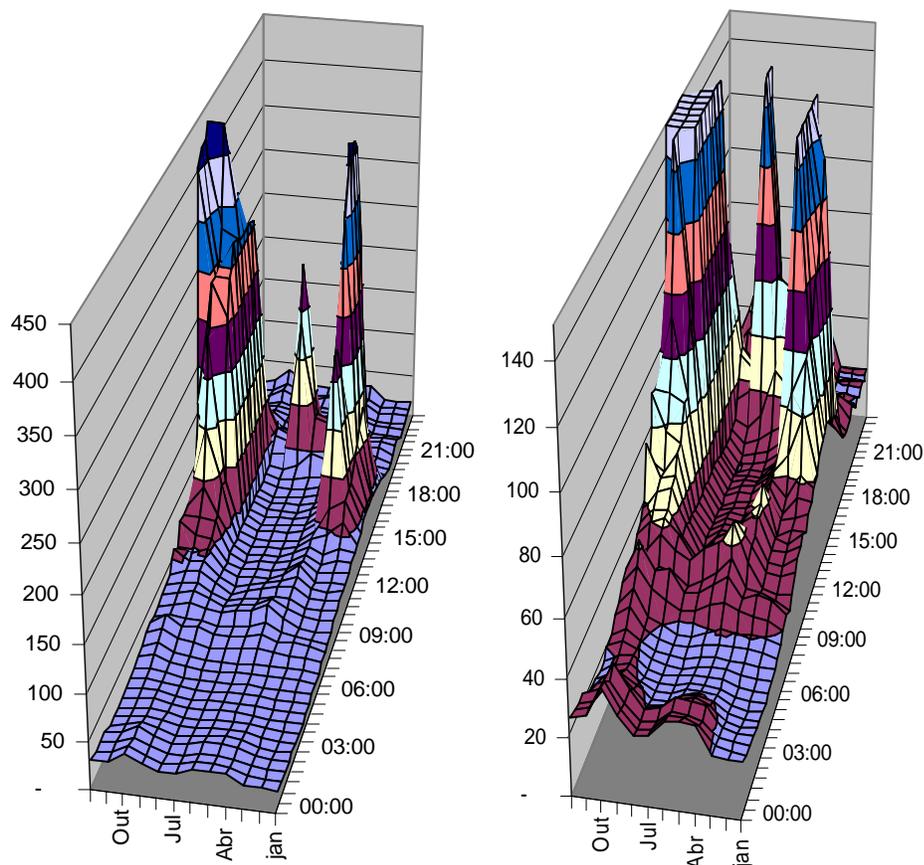
FONTE: Adaptação do autor

Na tabela 9 identificou-se dois resultados. No primeiro obtém-se uma maior quantidade de cenários positivos (96%) com um ganho médio de \$11 milhões e no segundo tem-se uma quantidade de cenários positivos menor (88%), porém com um ganho médio de \$24 milhões. Nestes cenários precisa-se definir qual o nível de risco que se quer correr: obter ganhos médios mais elevados com maior risco de perda ou obter maior quantidade de cenários positivos com ganho médio mais reduzido

Evolução de preços em horários diferenciados

Um simulador ideal deveria levar em consideração os horários mais prováveis de ocorrência de pico, de forma que se possa precificar opções por intervalos horários (1h, 4hs, 6hs, etc) do dia e não para o dia ou um mês como um todo, pois a probabilidade de menor incidência de picos ocorrerem na madrugada e horários fora de pico de consumo. Com isso pode-se ter 2 ou 3 períodos diferentes durante o dia, que possibilitaria preços de opções e proteções diferenciados por horário. Como exemplo podemos verificar o mercado NSW.

GRÁFICO 31 - Média de preço horários dos dias úteis do mercado NSW para o ano de 2004



FONTE: Adaptação do autor

Analisando o gráfico 31 (apresentados em duas escalas) percebe-se que as médias de preços mais elevadas ocorrem em períodos do dia entre as 12:00hs e às 20:00 hs e em alguns meses não se têm médias elevadas perceptíveis entre estes horários. Os meses de março, outubro, novembro e dezembro foram os que tiveram maiores médias de preços nos horários de pico entre 12:00hs e 18:00hs. Percebe-se que no mês de julho o horário de pico de preço foi deslocado para 19:30 hs às 20:30 hs, provavelmente devido ao período de férias. Os horários entre 0:00 hs e 6:00hs são os de mais baixo preço registrados em todos os meses do ano de 2004 no mercado NSW. Estas são variáveis que devem ser levadas em consideração em uma simulação mais detalhada, de forma a se obter preços de opção para períodos mais estreitos, fazendo com as opções se tornem mais caras, porém mais efetivas, gerando maior retorno com menores contratações de energia (proteções - MWh) mais centradas e com obtenção de menos sobra de energia.

CONCLUSÕES

A utilização de modelos gerais de difusão, baseados no movimento browniano, para o mercado de energia elétrica com o objetivo de modelar o comportamento do preço da eletricidade, bem como de precificação de derivativos, falham ao tentar capturar as características intrínsecas deste commodities. O preço da energia elétrica tende a flutuar em torno de uma média de custo de produção e frequentemente experimenta grandes mudanças de preço devido à eventos extraordinários tais como falta de energia, limitação da linha de transmissão, clima, etc.

Modelos que incorporam o processo de reversão à média levam vantagem sobre modelos puramente de difusão, pois logram em capturar algumas das características dos preços da energia, principalmente a tendência de oscilar aleatoriamente em torno de seu nível de custo de produção. A utilização do parâmetro “razão de reversão à média”, permite determinar a velocidade com que os preços vão regredir após um desvio positivo ou negativo dos preços.

Nenhum dos dois modelos acima apresentam a possibilidade de capturar uma das mais importantes características do preço da eletricidade, os saltos. Para solucionar este problema o modelo de reversão à média com difusão de saltos foi apresentado para que se pudesse introduzir mais este parâmetro, cuja característica principal é a descontinuidade no tempo instabilidade e imprevisibilidade. Este modelo apresenta resultados mais factíveis, quando separado em dois regimes (regime de salto e regime de reversão à média), de forma que quando um regime está ocorrendo, o outro está “desligado” e a probabilidade de ocorrência de um ou de outro, depende da probabilidade de picos ocorrerem.

Este modelo de dois regimes é utilizado tanto para a modelagem dos preços a vista da eletricidade como também para a precificação de opção de compra.

Após determinar o modelo a ser utilizado na simulação, procedeu-se com a análise para identificar a combinação (prêmio opção, Preço de exercício e volume de proteção em MWh) que maximizava os ganhos. Para isso foram feitas mais de 1 milhão de simulações onde se construíram tabelas e gráficos comparativos.

Como resultado obteve-se que meses com a combinação de maior probabilidade de pico com o maior desvio padrão de pico, geram a opção mais cara e a menor contratação de proteção, no entanto geram os ganhos mais elevados. Em contrapartida os meses com menor probabilidade de pico e baixo desvio padrão de pico, geram prêmios de opção mais baratos, porém exigem uma contratação maior de proteção e possuem um ganho mais baixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADESI, Giovanni Barone; GIGLI, Andrea. Electricity Derivatives. FINRISK – Mai/2002.

BUNN, Derek; KARAKATSANI, Nektaria. Forecasting Electricity Prices. London Bussiness School – 2003.

BLANCO, Carlos; Soronow David. Jump Diffuision Processes - Energy Price Processes used for derivatives pricing and risk management. FEA (Financial Engineering Associates) –2004.

BLANCO, Carlos. Modelling energy derivatives. FEA (Financial Engineering Associates) – 2001.

BURGER, Markus; KLAR, Bernhard; MÜLLER, Alfred; SCHINDLAMYSR, Gero. A spot market model for pricing derivatives in electricity markets. Universität Karlsruhe – 2002.

CERNY, Ales. Mathematical Techniques in finance. Tools for Incomplete Markets. Princeton University Press – 2004.

CHOI, Sue; Soronow David. Energy Price Processes used for derivatives pricing and risk management. FEA (Financial Engineering Associates) – 2004.

CLEWLOW, Les; STRICKLAND, Chris; KAMANINSKI, Vince. Energy Derivatives - Pricing and risk management. Lacima publications - 2000.

CRUZ, Carla; RIBEIRO, Uirá. Metodologia Científica, Teoria e Prática. Axcel Books do Brasil Editora – 2003.

DENG, Shijie. Stochastic Models of electricity Spot Price and their Applications. University of California Berkeley – 1999

DENG, Shijie. Pricing Electricity Derivatives Under Alternative Stochastic Spot Price Models. Georgia Institute of Technology. International Conference on System Sciences – 2000.

EYDELAND, Alexander; WOLYNIEC; Krzysztof. Energy and Power management , New development in Modeling, Pricing and Hedging. John Wiley & Sons, Inc. – 2003.

EYDELAND, Alexander;GERMAN, Helyette. Some fundamentals of Electricity Derivatives. University Paris IX Dauphine and ESSEC – Jul/1998

GOTO, Mika; KAROLYI, G. Andrew. Understanding Electricity Price Volatility within and across markets. Ohio State University – Ago/2003

GRANVILLE, Sergio. Análise e Mitigação de Riscos. Fundação Getúlio Vargas, FGV management – Mar/2003

HULL, John. Options Future and Derivative Securities – Prentice Hall - Englewood Cliffs, New Jersey (1993)

JIANG, George J. Jump Diffusion Model of Exchange Rate Dynamics – Estimation via Indirect Inference. University of Groningen – Mai/1998

JONG, Cyriel, HUISMAN, Ronald;. Option Formulas for Mean-Reverting Power Prices with Spikes. Erasmus Research Institute of Management – out/2002.

HJALMARSSON, Erik. Does the Black- Sholes formula work for electricity markets? A nonparametric approach. Working paper in Economics – Jul/2003

HLADRUP, Niels; NIELSEN, Morten. A Regime Switching Long Memory Model for Electricity Prices. University of Aarhus – Abr/2004.

HUISMAN, Ronald; MAHIEU, Ronald. Regime Jumps in Electricity Prices. Rotterdam School of management – Jun/2001.

HULL J. C. Option, Futures and other derivative Securities, Prentice Hall, NJ, 1993.

KEPPO, Jussi. Pricing of electricity Swing Options. University of Michigan – Jan/2004

PILIPOVIC, Dragana. Energy Risk, Valuing and Managing Energy Derivatives. McGraw-Hill – 1998.

SORONOW, David. Mean reverting Processes - Energy Price Processes used for derivatives pricing and risk management. FEA (Financial Engineering Associates) – 2004.

SAMUELSON, Paul A. et al. ECONOMIA 10. ed. Portugal: Macgraw- Hill, 1993.

WERON, Rafal; SIMONSEN, Ingve; WILMAN, Piotr. Modeling Highly volatile and seasonal markets evidence from the Nord Pool electricity market. Wroclaw Univerity – Abr/2003.

_____ An introduction to australian's national electricity market – Jun/2004. National Electricity Market Management Company Limited (NEMMCO). www.nemmco.com.au.

APÊNDICE

Simulação de cenários para maximização do ganho com a compra de eletricidade no mercado australiano

Cenário	Strike	1ª simulação					100 simulações				
		150000	100000	75000	50000	30000	20000	10000	5000	3000	2000
Proteção											
20	7537	51,57	49%	54%	39%	38%	32%	31%			
Ganho	3.738.807,30	3.570.457,19	3.337.330,44	874.254,87	506.767,24	1.196.050,21	764.963,77				
opção	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25	17,25				
Despav	448,57	503,52	491,91	533,15	503,36	541,21	470,41				
% pico	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%				
35	2.504.377,85	1.245.502,34	753.281,62	370.841,66	133.539,18	61.608,36	14.986,51				
Ganho	36.142.977,80	41.054.082,93	39.720.541,59	37.117.147,90	32.216.695,06	26.168.039,67	20.222.034,14				
opção	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90				
Despav	528,35	516,72	500,04	521,13	498,19	482,38	517,08				
% pico	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%	3,891%				
45	3.897.158,63	2.411.043,50	1.685.070,34	990.164,45	407.057,63	237.156,77	69.292,06				
Ganho	34.244.295,79	45.997.529,34	48.297.973,46	50.913.035,23	50.533.112,95	49.368.141,38	34.152.286,32				
opção	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50				
Despav	528,69	537,38	531,01	519,16	479,58	547,74	517,02				
% pico	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%	3,940%				
55	4.204.761,77	2.706.025,58	1.950.656,11	1.197.953,09	616.867,73	345.647,43	110.221,56				
Ganho	33.527.365,14	35.215.789,56	45.893.657,80	55.286.511,16	53.990.983,27	45.373.856,63	38.005.800,52				
opção	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07				
Despav	521,38	486,51	523,36	544,90	521,37	485,28	514,97				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				
70	4.321.078,40	2.830.725,26	2.071.385,90	1.325.789,42	721.035,89	424.951,48	155.854,30				
Ganho	30.243.968,83	35.638.585,20	42.115.449,37	46.332.537,74	48.291.170,06	49.521.749,51	43.724.637,33				
opção	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81				
Despav	527,93	515,30	500,26	523,41	499,01	505,60	528,49				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				
90	4.402.151,45	2.901.137,94	2.146.822,10	1.396.921,35	798.684,76	502.264,28	207.032,63				
Ganho	27.948.351,63	32.984.797,97	38.385.029,92	41.100.020,85	45.565.390,93	47.491.325,33	50.356.282,84				
opção	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66				
Despav	518,68	494,64	499,94	483,65	500,38	516,99	562,65				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				
110	4.421.538,70	2.923.614,60	2.174.294,49	1.421.168,49	824.318,31	523.113,42	227.094,11				
Ganho	22.159.497,23	31.833.602,20	36.687.838,03	45.090.613,58	42.665.377,77	44.308.380,39	47.015.373,43				
opção	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82				
Despav	486,62	514,55	501,02	529,60	503,59	496,13	544,07				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				

Cenário	Strike	2ª simulação					300 simulações				
		150000	100000	75000	50000	30000	20000	10000	5000	3000	2000
Proteção											
45	515.894,49	731.202,77	852.778,32	990.114,82	1.079.776,17	1.262.916,63	1.558.235,44				
Ganho	50.297.941,72	49.288.612,91	52.554.891,63	48.377.758,77	47.894.146,65	48.687.914,08	45.083.010,64				
opção	6,55	6,55	6,55	6,55	6,55	6,55	6,55				
Despav	508,22	511,19	527,63	485,98	499,83	520,86	510,35				
% pico	3,955%	3,955%	3,955%	3,955%	3,955%	3,955%	3,955%				
48	586.803,56	798.401,89	949.643,83	1.078.097,80	1.179.575,16	1.362.896,30	1.668.765,44				
Ganho	51.467.488,25	49.966.502,54	50.294.368,70	50.887.552,49	50.086.233,77	47.989.488,46	49.185.695,45				
opção	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23				
Despav	510,15	508,60	517,83	526,99	523,62	501,48	524,53				
% pico	3,862%	3,862%	3,862%	3,862%	3,862%	3,862%	3,862%				
52	644.206,96	875.790,37	1.018.137,57	1.171.695,31	1.254.132,16	1.466.193,81	1.765.905,13				
Ganho	50.956.920,34	48.468.111,31	50.978.199,09	47.757.739,52	47.590.617,77	48.220.343,47					
opção	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06				
Despav	508,71	503,64	515,62	498,14	519,30	504,51	532,02				
% pico	3,872%	3,872%	3,872%	3,872%	3,872%	3,872%	3,872%				
56	687.664,01	924.047,30	1.070.515,64	1.218.240,47	1.309.453,13	1.517.207,63	1.821.449,00				
Ganho	50.695.096,84	53.947.129,60	52.748.194,27	48.173.951,15	48.199.251,45	47.858.934,27	44.416.637,95				
opção	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93	5,93				
Despav	499,38	523,36	529,84	503,18	510,26	511,89	507,07				
% pico	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%	3,8%				
60	720.493,99	958.440,14	1.108.755,56	1.255.350,06	1.346.194,04	1.557.676,23	1.852.737,83				
Ganho	51.069.583,53	46.896.590,32	46.911.722,97	47.746.949,96	47.947.357,37	45.325.630,16	45.608.421,09				
opção	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00				
Despav	511,16	491,97	506,02	511,04	518,42	507,42	524,41				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				
65	754.117,27	989.545,86	1.144.811,50	1.290.305,91	1.379.949,92	1.593.632,69	1.893.157,93				
Ganho	48.859.167,28	50.451.721,03	46.259.045,87	47.445.142,83	49.138.011,57	42.393.627,92	42.398.271,67				
opção	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94	5,94				
Despav	507,66	527,84	518,19	515,73	535,51	493,48	512,46				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				
70	780.210,46	1.020.644,66	1.168.374,34	1.323.940,82	1.413.669,05	1.619.622,27	1.919.353,08				
Ganho	49.677.879,16	47.230.372,55	48.482.617,82	45.111.124,05	42.046.451,74	47.035.580,36	45.471.511,89				
opção	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82				
Despav	521,06	507,06	522,76	511,99	483,62	522,10	527,20				
% pico	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%				

Cenário	Strike	3ª simulação					1000 simulações				
		32000	34000	36000	38000	40000	42000	44000	46000	48000	50000
Proteção											
52	647.431,40	703.567,96	760.160,93	818.204,19	877.489,07	935.880,72	993.696,10				
Ganho	51.959.717,98	51.133.034,03	51.339.026,24	51.892.340,25	51.892.340,25	50.629.214,16	52.038.095,10				
opção	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04	6,04				
Despav	508,79	510,13	509,22	519,88	508,76	520,06	524,16				
% pico	3,875%	3,875%	3,875%	3,875%	3,875%	3,875%	3,875%				
54	669.200,18	728.620,93	784.884,52	845.346,92	903.019,65	964.653,39	1.024.040,29				
Ganho	51.538.581,26	51.765.261,75	51.174.818,88	51.749.429,49	51.224.726,16	49.046.065,04	50.204.879,44				
opção	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09				
Despav	513,72	511,60	513,50	518,76	520,91	496,19	513,58				
% pico	3,928%	3,928%	3,928%	3,928%	3,928%	3,928%	3,928%				
56	685.818,52	747.394,41	803.424,62	863.826,36	920.660,51	984.515,73	1.042.211,04				
Ganho	53.055.245,56	51.765.396,42	50.266.215,31	50.266.215,31	50.266.215,31	50.266.215,31	50.266.215,31				
opção	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98				
Despav	522,43	514,90	508,13	512,52	514,26	504,44	508,79				
% pico	3,890%	3,890%	3,890%	3,890%	3,890%	3,890%	3,890%				
58	702.620,61	762.369,52	822.460,48	882.836,56	941.662,69	998.904,12	1.061.288,97				
Ganho	51.300.831,50	51.005.040,02	50.604.533,43	50.284.684,59	49.921.058,37	49.625.875,53	48.668.681,27				
opção	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03				
Despav	511,56	513,14	521,09	512,10	516,29	510,34	520,50				
% pico	3,9%										

Simulação de cenários para maximização do ganho com a compra de eletricidade no mercado australiano

Março		1000						
Strike	Proteção							
	150000	100000	75000	50000	30000	20000	10000	
20	63%	55%	47%	48%	43%	36%	30%	
20	20.631,01	2.941,49	181,92	145,42	-	2.177,272,27	1.115,923,09	
16.653.367,47	13.245.711,10	10.829.746,31	6.140.243,66	4.838.215,68	2.177,272,27	15,09	15,09	
15,09	15,09	15,09	15,09	15,09	15,09	15,09	15,09	
916,36	956,06	970,56	962,28	969,63	931,62	965,46	965,46	
2.962%	2.962%	2.962%	2.962%	2.962%	2.962%	2.962%	2.962%	
84%	96%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	
3.605.879,26	2.084.258,86	1.419.369,87	751.963,66	341.117,16	160.788,53	50.336,96	50.336,96	
47.975.191,81	63.607.588,44	48.489.206,14	63.290.382,78	55.859.842,32	60.513.278,26	45.618.640,89	45.618,640,89	
8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	
982,20	1.028,33	915,88	1.024,69	958,11	1.024,69	958,11	958,11	
2.954%	2.954%	2.954%	2.954%	2.954%	2.954%	2.954%	2.954%	
84%	92%	95%	97%	100%	100%	100%	100%	
4.219.285,82	2.730.857,48	1.984.791,76	1.227.978,76	657.909,89	373.056,69	129.489,69	129.489,69	
40.506.109,39	55.847.813,18	65.815.392,11	69.038.747,08	66.938.580,68	74.569.980,64	53.456.981,66	53.456.981,66	
8,46	8,46	8,46	8,46	8,46	8,46	8,46	8,46	
947,01	999,46	984,19	956,34	940,62	1.024,03	907,80	907,80	
2.923%	2.923%	2.923%	2.923%	2.923%	2.923%	2.923%	2.923%	
83%	98%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	
4.331.592,39	2.833.767,21	2.082.201,72	1.330.235,25	734.394,80	437.201,52	165.783,09	165.783,09	
37.508.669,90	56.340.827,61	63.473.085,22	69.550.803,41	66.818.417,92	70.622.893,60	61.160.131,87	61.160.131,87	
8,07	8,07	8,07	8,07	8,07	8,07	8,07	8,07	
921,74	951,12	979,87	992,59	976,19	982,34	936,86	936,86	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	
83%	93%	95%	97%	100%	100%	100%	100%	
4.407.793,71	2.907.312,86	2.154.871,85	1.407.470,26	810.916,56	512.864,10	217.582,65	217.582,65	
44.021.106,55	60.906.412,51	65.653.997,18	62.979.885,48	67.891.699,94	71.164.724,31	68.260.028,87	68.260.028,87	
8,14	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14	8,14	
971,64	1.035,93	1.003.979,80	887,02	951,48	972,23	909,84	909,84	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	
89%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
4.434.370,79	2.932.647,55	2.186.019,49	1.431.114,94	832.167,90	533.166,94	237.393,06	237.393,06	
35.173.669,00	49.569.635,42	51.274.913,09	59.497.850,89	68.179.966,19	68.489.505,09	59.175.963,75	59.175.963,75	
914,58	930,14	913,03	903,17	979,84	915,55	855,48	855,48	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	
79%	91%	95%	95%	98%	100%	100%	100%	
4.451.403,39	2.949.495,27	2.199.359,91	1.452.923,04	847.645,18	547.685,35	248.499,69	248.499,69	
34.466.658,14	50.251.246,31	51.538.346,81	55.552.989,09	66.336.300,00	66.854.318,86	67.652.688,30	67.652.688,30	
7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	
946,20	994,21	914,16	914,16	970,31	944,75	903,37	903,37	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	

Abril		2ª simulação 1000 simulações						
Strike	Proteção							
	200000	175000	160000	150000	140000	120000	110000	
15	65%	68%	63%	61%	61%	63%	63%	
15	1.633.338,46	1.615.557,96	1.313.613,54	1.047.155,05	979.012,15	1.049.975,88	929.253,70	
11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	11,76	
41,49	41,98	41,87	41,84	40,94	40,69	42,66	42,66	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
86%	84%	81%	78%	76%	75%	75%	75%	
4.029,50	971,51	175,78	137,50	134,71	-	-	-	
3.653.591,96	3.063.650,26	2.799.213,97	2.654.846,43	2.359.536,00	1.976.189,44	1.694.971,71	1.694.971,71	
8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
438,400,41	205.871,49	119.084,25	78.774,23	53.189,22	21.231,40	13.623,42	13.623,42	
8.619.855,19	8.526.941,38	8.632.672,30	7.935.766,02	7.343.948,66	6.230.400,67	5.922.594,78	5.922,594,78	
5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	
41,98	42,07	42,04	41,49	41,62	41,10	41,10	41,71	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
1.682.781,44	1.102.572,82	816.390,34	664.477,92	518.160,11	289.401,96	208.950,62	208.950,62	
8.511.478,21	9.919.580,56	10.443.919,08	10.335.260,91	10.414.282,67	9.801.930,44	9.186.866,94	9.186.866,94	
3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77	
41,16	40,63	41,81	41,97	41,67	41,88	42,02	42,02	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
3.119.715,51	2.415.200,83	2.023.798,89	1.755.267,39	1.491.312,13	1.050.983,86	849.556,19	849.556,19	
6.716.638,92	8.293.559,84	8.807.611,73	9.040.675,58	9.707.826,32	9.981.218,83	9.947.139,84	9.947.139,84	
2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	
41,75	42,00	41,24	40,95	41,14	41,14	41,94	41,94	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
42.776.570,25	3.534.429,09	3.072.633,24	2.792.875,32	2.508.261,68	1.945.864,40	1.657.743,26	1.657.743,26	
4.827.101,08	5.982.615,04	6.740.606,55	7.118.509,12	7.444.323,32	7.997.933,32	8.332.719,64	8.332.719,64	
1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	
41,90	41,26	42,04	41,85	41,74	40,85	40,55	40,55	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	
89%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
5.165.924,34	4.420.516,85	3.969.254,71	3.676.948,57	3.372.426,90	2.777.058,86	2.475.737,26	2.475.737,26	
3.572.029,83	4.424.864,08	4.724.767,64	5.074.990,82	5.348.896,13	5.897.430,88	6.141.811,01	6.141.811,01	
0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	
41,63	42,23	41,19	41,87	41,82	41,82	41,84	41,84	
2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	

Março		1000						
Strike	Proteção							
	30000	25000	22000	20000	18000	15000	10000	
37	95%	92%	100%	100%	100%	100%	100%	
37	424.809,73	319.638,90	260.649,27	223.379,29	183.475,61	136.242,68	68.049,21	
66.612.792,27	61.115.679,70	62.751.470,17	58.837.294,75	56.337.777,08	53.873.489,91	42.963.094,94	42.963,094,94	
8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	
874,58	867,67	867,67	867,67	867,67	867,67	867,67	867,67	
2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
541.774,27	411.998,19	341.518,47	293.899,32	247.435,05	185.925,57	96.293,08	96.293,08	
69.460.106,04	67.741.197,68	66.274.053,77	63.931.596,24	64.960.249,98	60.363.161,32	50.150.181,98	50.150,181,98	
8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49	
964,07	942,44	941,16	917,43	957,63	948,01	923,12	923,12	
2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	2.929%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
594.766,66	456.594,90	378.873,36	328.900,34	278.010,92	211.300,46	110.161,58	110.161,58	
70.549.273,24	70.953.886,38	68.961.464,30	68.139.224,93	69.125.948,33	61.163.878,32	53.930.342,12	53.930,342,12	
8,31	8,31	8,31	8,31	8,31	8,31	8,31	8,31	
956,29	952,72	960,39	964,24	965,37	909,55	950,87	950,87	
2.913%	2.913%	2.913%	2.913%	2.913%	2.913%	2.913%	2.913%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
647.818,73	506.640,95	423.155,33	367.669,63	316.495,10	237.635,68	127.085,48	127.085,48	
73.366.634,74	71.686.798,84	68.697.979,68	69.690.113,76	71.468.282,51	66.070.242,55	57.288.857,69	57.288,857,69	
956,61	951,29	913,73	949,98	961,20	941,34	960,87	960,87	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
674.750,62	529.143,12	443.900,72	386.544,15	331.493,75	251.037,00	135.453,25	135.453,25	
72.099.681,78	69.803.311,33	73.866.769,59	72.251.059,68	69.836.102,48	69.151.939,21	59.290.335,92	59.290,335,92	
8,29	8,29	8,29	8,29	8,29	8,29	8,29	8,29	
969,07	921,69	967,08	950,88	932,52	969,69	909,88	909,88	
2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
703.954,86	553.400,79	467.067,42	410.165,11	350.045,89	271.468,28	149.216,31	149.216,31	
69								

Simulação de cenários para maximização do ganho com a compra de eletricidade no mercado australiano

		3ª simulação 1000 simulações												
Strike	40000		37000		34000		31000		27000		24000		20000	
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50	782.035,70	697.085,53	624.736,74	546.342,93	443.712,27	370.302,33	280.058,21							
	39.103.015,92	38.919.181,44	39.847.420,17	39.846.328,98	38.652.462,93	38.785.488,82	37.009.671,10							
	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88							
	591,11	582,47	601,02	604,29	593,92	604,18	590,76							
	2,441%	2,441%	2,441%	2,441%	2,441%	2,441%	2,441%							

		1ª simulação 100 simulações												
Strike	150000		100000		75000		50000		35000		20000		15000	
	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	
25	565.394,02	5.767.083,67	5.093.227,61	3.651.043,41	(349.107,27)	3.621.585,65	1.693.314,86							
	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69	22,69							
	1.099,07	1.123,37	1.091,81	1.119,94	1.176,74	1.157,96	1.239,80							
	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%	3,2%							
	89%	88%	83%	79%	74%	73%	64%							

		2ª simulação 500 simulações												
Strike	17000		15000		12000		10000		8000		5000		3000	
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
57	281.133,31	231.196,74	156.323,07	119.382,71	83.665,36	38.757,58	22.806,06							
	92.294.409,14	89.643.096,84	81.082.953,68	76.492.096,15	65.432.920,75	46.813.925,80	28.636.655,80							
	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87	10,87							
	1.147,99	1.158,18	1.114,54	1.208,79	1.163,66	1.158,59	1.156,43							
	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%							

		3ª simulação 1000 simulações												
Strike	25000		22000		20000		18000		17000		16000		15000	
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
60	522.567,09	435.664,77	376.481,05	320.022,08	294.200,19	268.691,80	241.808,56							
	95.034.938,51	92.856.232,89	97.379.862,25	95.263.999,62	92.977.837,40	91.445.198,50	88.634.378,76							
	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77	10,77							
	1.151,18	1.130,45	1.174,59	1.172,37	1.164,39	1.157,27	1.153,41							
	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%							

		1ª simulação 100 simulações												
Strike	150000		100000		75000		50000		30000		20000		10000	
	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	45%	
20	5.008.562,02	4.368.418,14	4.174.980,18	1.931.446,13	1.390.889,92	(1.158.017,08)	(29.883,84)							
	23,29	23,29	23,29	23,29	23,29	23,29	23,29							
	1.246,73	1.322,79	1.231,73	1.325,17	1.351,86	1.318,17	1.432,88							
	2,183%	2,183%	2,183%	2,183%	2,183%	2,183%	2,183%							
	84%	78%	78%	81%	83%	80%	69%							

		2ª simulação 500 simulações												
Strike	150000		100000		75000		50000		30000		20000		10000	
	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	
50	4.145.334,94	2.650.363,65	1.901.182,23	1.684.714,47	590.278,21	336.430,55	115.310,96							
	42.264.322,82	55.173.611,04	61.517.124,05	68.714.605,37	70.945.094,00	74.226.945,92	60.493.584,19							
	6,73	6,73	6,73	6,73	6,73	6,73	6,73							
	1.217,88	1.230,26	1.230,73	1.247,39	1.230,17	1.303,24	1.328,52							
	2,198%	2,198%	2,198%	2,198%	2,198%	2,198%	2,198%							

Simulação de cenários para maximização do ganho com a compra de eletricidade no mercado australiano

Julho		1000									
Strike	Proteção										
	30000	25000	22000	20000	18000	15000	10000	7500	5000	3000	2000
60	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
65	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
70	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%
75	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%	96%
80	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
85	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%
90	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%

Agosto		100 simulações									
Strike	Proteção										
	15000	10000	7500	5000	3500	2000	1500	1000	500	200	
25	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
35	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
45	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
55	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
65	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
75	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
85	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	
95	70%	63%	51%	53%	25%	33%	34%	38%	38%	38%	

Agosto		500									
Strike	Proteção										
	6500	5500	5000	4000	3500	3000	2000	1000	500	200	
45	97%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	
50	96%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%	
55	95%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	93%	
60	94%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	92%	
65	93%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	
70	92%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	

Setembro		100									
Strike	Proteção										
	17500	15000	10000	7500	5000	3000	2000	1000	500	200	
20	77%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
35	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
45	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
55	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
65	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
75	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
85	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	
95	76%	80%	69%	78%	61%	51%	46%	46%	46%	46%	

Setembro		500									
Strike	Proteção										
	17500	15000	10000	7500	5000	3000	2000	1000	500	200	
30	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
35	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
45	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
55	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
65	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
75	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
85	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
95	96%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

Setembro		1000									
Strike	Proteção										
	15000	13000	12000	11000	10000	9000	8000	7000	6000	5000	
20	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
25	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
30	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
35	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
40	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
45	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
50	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
55	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	
60	79%	76%	76%	73%	73%	73%	69%	69%	69%	69%	

Simulação de cenários para maximização do ganho com a compra de eletricidade no mercado australiano

		Outubro 1* 200												
Strike	150000		100000		75000		Proteção 50000		30000		20000		10000	
	58%	47%	45%	35%	31%	32%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
20	648,86	1.189.707,05	1.680.598,68	1.913.770,52	301.482,82	757.098,08	760.977,71	204.040,12						
35	3.148.028,67	1.723.743,13	1.125.951,45	579.852,60	246.107,99	128.420,26	38.084,12							
45	4.251.858,92	2.756.574,98	1.994.267,56	1.262.776,19	691.898,44	403.548,32	153.734,00							
55	11.421.963,69	14.618.961,70	16.504.005,98	16.716.150,80	20.413.892,61	20.210.924,12	17.784.485,49							
70	4.419.864,27	2.920.235,47	2.167.468,86	1.419.845,09	819.438,58	519.740,43	226.307,72							
90	4.452.720,39	2.952.348,98	2.200.129,68	1.450.591,63	849.829,12	550.433,72	253.858,40							
110	7.733.913,48	11.121.477,37	12.576.864,11	15.605.027,65	14.379.579,60	16.915.905,36	16.029.875,15							

		Outubro 2* 1000												
Strike	30000		25000		22000		Proteção 22000		18000		15000		10000	
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
37	367.539,19	279.006,60	226.866,95	196.287,39	165.755,58	126.792,36	65.856,78							
40	19.878.045,47	19.307.348,05	18.904.772,10	18.785.155,91	18.447.980,02	17.923.055,66	15.331.189,77							
42	604.888,15	473.103,84	397.842,10	350.442,92	299.776,95	233.756,12	129.478,88							
45	830.353,05	545.937,43	459.102,58	405.172,81	351.927,61	274.480,69	155.150,51							
55	20.604.074,38	19.958.543,97	21.212.183,00	20.259.022,25	20.262.243,59	19.652.524,21	17.055.552,60							
70	743.759,40	596.705,03	508.984,12	450.161,29	392.795,72	307.535,68	176.725,66							
90	755.842,67	608.138,23	520.405,11	459.714,43	401.979,28	315.977,91	182.432,04							
110	19.350.141,86	20.063.363,53	20.103.771,18	19.737.102,18	20.078.979,92	19.821.226,36	17.473.044,31							

		Novembro 1* 100												
Strike	150000		100000		75000		Proteção 50000		30000		20000		10000	
	52%	44%	39%	32%	32%	25%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	
20	1,21	3.374.558,24	1.643.408,66	1.797.097,11	1.026.278,84	1.520.959,02	585.079,64	851.690,52						
35	3.530.207,90	2.059.983,61	1.393.950,94	755.759,05	347.325,93	183.892,64	57.396,16							
45	4.303.067,08	2.807.130,59	2.045.984,82	1.309.113,22	713.003,22	422.304,83	158.372,00							
55	11.807.244,24	14.618.961,70	16.504.005,98	16.716.150,80	20.413.892,61	20.210.924,12	17.784.485,49							
70	4.430.439,83	2.923.373,76	2.175.571,58	1.425.474,32	824.129,17	521.358,25	228.471,41							
90	4.448.684,01	2.950.678,99	2.199.322,36	1.448.603,17	849.474,33	549.169,82	251.455,73							
110	7.733.913,48	11.121.477,37	12.576.864,11	15.605.027,65	14.379.579,60	16.915.905,36	16.029.875,15							

		Novembro 2* 500												
Strike	75000		60000		50000		Proteção 40000		30000		20000		10000	
	69%	59%	53%	42%	42%	37%	37%	37%	37%	37%	37%	37%	37%	
25	15.188,03	6.630,83	3.367,30	2.000,69	467,06	133,63	68,08							
35	1.380.037,89	994.274,02	754.511,95	544.113,29	342.937,59	179.869,33	56.004,21							
45	2.056.078,91	1.608.226,55	1.308.126,55	1.010.798,31	714.891,73	426.923,92	158.860,27							
55	26.296.733,49	28.153.559,12	29.626.349,93	30.493.019,94	33.203.902,94	32.264.143,15	27.809.997,51							
70	2.124.722,77	1.671.482,78	1.371.266,98	1.072.437,55	771.834,38	473.751,17	190.436,49							
90	2.124.722,77	1.671.482,78	1.371.266,98	1.072.437,55	771.834,38	473.751,17	190.436,49							
110	2.124.722,77	1.671.482,78	1.371.266,98	1.072.437,55	771.834,38	473.751,17	190.436,49							

		Novembro 3* 1000												
Strike	40000		36000		33000		Proteção 30000		28000		25000		20000	
	99%	100%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
38	775.871,26	673.913,54	595.724,77	522.399,72	470.550,75	400.574,63	290.816,14							
42	952.579,09	839.237,76	747.374,11	662.208,56	608.059,28	523.306,19	386.009,57							
45	1.010.182,51	892.725,63	802.859,79	714.790,05	655.943,07	568.211,93	426.687,80							
55	30.450.123,44	29.201.880,50	31.623.250,56	32.710.716,59	32.186.123,93	32.702.805,80	31.407.711,95							
70	1.052.917,75	932.669,52	844.129,06	755.013,12	693.704,54	604.425,87	455.569,43							
90	1.052.917,75	932.669,52	844.129,06	755.013,12	693.704,54	604.425,87	455.569,43							
110	1.052.917,75	932.669,52	844.129,06	755.013,12	693.704,54	604.425,87	455.569,43							

		Dezembro 2* 500												
Strike	40000		30000		25000		Proteção 20000		15000		10000		5000	
	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	
45	975.147,00	684.705,06	542.094,07	407.717,06	273.910,76	152.857,44	66.323,23							
55	1.069.412,57	770.370,88	620.088,33	472.296,66	326.392,68	188.676,42	74.444,44							
70	1.139.267,78	836.766,83	687.297,07	537.948,88	391.112,22	241.491,01	105.434,34							
90	1.139.267,78	836.766,83	687.297,07	537.948,88	391.112,22	241.491,01	105.434,34							
110	1.139.267,78	836.766,83	687.297,07	537.948,88	391.112,22	241.491,01	105.434,34							