



Marcela Jacob Alves

Determinação do Preço no Mercado de Energia Elétrica Brasileiro e valoração de um Derivativo de Energia por Simulação Monte Carlo com Aproximação por Algoritmo Genético

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marco Aurélio C. Pacheco
Co-orientador: Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo

Rio de Janeiro
Junho de 2011



Marcela Jacob Alves

Determinação do Preço no Mercado de Energia Elétrica Brasileiro e Valoração de um Derivativo de Energia por Simulação Monte Carlo com Aproximação por Algoritmo Genético

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo
Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Profa. Karla Tereza Figueiredo Leite
UEZO

Prof. Marco Antonio Guimarães Dias
Petrobrás

Prof. Evandro Leite Vasconcelos
Light S.A.

Prof. André Vargas Abs da Cruz
Pesquisador do ICA-DEE-PUC-Rio

Prof. Douglas Mota Dias
Pesquisador do ICA-DEE-PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 8 de junho de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcela Jacob Alves

Graduou-se em Engenharia Eletrica na Universidade Estadual do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro em 1999. Cursou Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na PUC-RJ de 2009 a 2010. Atualmente é responsável pela Gerência de Desenvolvimento de Negócios da comercializadora do Grupo Light.

Ficha Catalográfica

Alves, Marcela Jacob

Determinação do preço no mercado de energia elétrica brasileiro e valoração de um derivativo de energia por simulação Monte Carlo com aproximação por algoritmo genético / Marcela Jacob Alves ; orientador: Marco Aurélio C. Pacheco. – 2011.

96 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Derivativos. 3. Opções reais. 4. Algoritmos genéticos. 5. Simulação Monte Carlo. 6. Processo estocástico. I. Pacheco, Marco Aurélio C. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

à minha família

Agradecimentos

À minha família, meus pais e irmãos, e ao meu companheiro Cláudio que me apoiaram vibraram e sofreram comigo durante cada etapa.

Aos meus orientadores Marco Aurélio Pacheco e Juan G. Lazo Lazo pela paciência, auxílio e dedicação ao longo de todo o estudo.

À professora Karla Figueiredo pelo apoio, comentários e incentivos que contribuíram para este trabalho.

Ao professor Augusto (Vice Reitor Comunitário) pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos amigos da Light e do setor elétrico em geral que me apoiaram e me forneceram dados importantes a minha pesquisa.

Aos professores, funcionários, amigos do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio e do ICA pelos ensinamentos e ajuda.

Resumo

Alves, Marcela Jacob; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Lazo, Juan Guillermo Lazo. **Determinação do Preço no Mercado de Energia Elétrica Brasileiro e valoração de um Derivativo de Energia por Simulação Monte Carlo com Aproximação por Algoritmo Genético.** Rio de Janeiro, 2011. 96p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No Brasil, o comportamento dos preços da energia elétrica no mercado de curto prazo é especialmente incerto, pois não segue um padrão definido e é obtido a partir de um modelo computacional e não pelo equilíbrio de mercado entre oferta e demanda. Diante disto o mercado de opções e derivativos ao mesmo tempo em que promissor, tendo em vista as experiências de outros países, é insipiente, pois os agentes não conseguem utilizar metodologias tradicionais para a precificação destes produtos e acabam formatando os valores por experiências empíricas e segundo aceitação do mercado. Muitos trabalhos já foram desenvolvidos propondo novas soluções para a previsão de preços modificando profundamente a estrutura atual, por outro lado o objetivo deste trabalho em sua primeira parte não busca modificar o modelo atual de previsão de preços que serve de alicerce para os contratos atuais, e por isso não pode ser desprezada. Este trabalho em sua primeira parte visa desenvolver um modelo para representar o comportamento dos preços no mercado de energia brasileiro e melhorar a previsão de preços que atualmente é fornecido pelo Newave, mas sem deslocar-se dos resultados gerados por ele. Em um segundo momento busca uma metodologia computacionalmente viável para determinar o valor de opções que podem ser oferecidas em contratos de opção de longo prazo. Para desenvolver a solução, foi proposto um processo estocástico que pudesse modelar a previsão dos preços no mercado de curto prazo reduzindo a volatilidade, mas sem se distanciar do atual modelo de previsão. Num segundo momento para permitir a precificação destes contratos este estudo aprofundou-se na teoria das opções que permite considerar as flexibilidades gerenciais, tendo por objetivo maximizar o retorno de uma determinada opção contratual. Assim, com o emprego de ferramentas como o Algoritmo Genético e Simulação Monte Carlo para aproximar a curva de exercício ótimo e o novo processo estocástico de formação de preço, foi possível determinar o valor das opções estudadas. A principal contribuição deste trabalho é

criar uma metodologia coerente de precificação de opções contratuais, atualmente inexistente no mercado e que possa ser testada e avaliada pelos operadores, contribuindo para o aumento e desenvolvimento do mercado de derivativos no setor elétrico brasileiro.

Palavras-Chave

Derivativos; Opções Reais; Algoritmos Genéticos; Simulação Monte Carlo; Processo estocástico.

Abstract

Alves, Marcela Jacob; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Advisor); Lazo, Juan Guillermo Lazo (Co-Advisor). **Determination of Brazilian Electricity Market Price and value of energy derivatives with Monte Carlo Simulation Approach for Genetic Algorithm.** Rio de Janeiro, 2011, 96p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In Brazil, the behavior of electricity prices in the short term market is especially uncertain, because it follows a pattern set and is obtained from a computer model rather than the market equilibrium between supply and demand. In view of this the market for options and derivatives at the same time as promising, given the experiences of other countries, know not, because the agents can not use traditional methods for the pricing of these products end up formatting the values and experiences and the second empirical market acceptance. Many works have been developed proposing new solutions for forecasting prices profoundly modifying the current structure, otherwise the objective of this work in the first part does not seek to modify the current model of forecasting prices that serves as the foundation for current contracts, and so it can not be neglected. This work in its first part aims to develop a model to represent the behavior of prices in the Brazilian energy market and improve the forecasting of prices that is currently provided by Newave, but without moving the results generated by it. In a second step a search computationally feasible method to determine the value of options that can be offered on contracts for the long term. To develop the solution, we proposed a stochastic model that could forecast the market price of reducing short-term volatility, but not away from the current forecasting model. In a second time to allow the pricing of these contracts this study deepened the theory of options that allows to consider the managerial flexibility, aiming to maximize the return on a particular option contract. Thus, with the use of tools such as Genetic Algorithms and Monte Carlo simulation to approximate the optimal exercise curve and the new stochastic process of price formation, it was possible to determine the value of the options studied. The main contribution of this work is to create a consistent methodology for pricing options contract, currently non-existent in the market and that can be tested and evaluated by the operators,

contributing to the growth and development of the derivatives market in the Brazilian electric sector.

Keywords

Derivative; Real Options; Genetic Algorithm; Monte Carlo Simulation; Stochastic Process

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Motivação	15
1.2.	Objetivo	17
1.3.	Descrição da Dissertação	17
1.4.	Contribuições	18
1.5.	Organização da Dissertação	19
2	Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro	21
2.1.	Principais Entidades do Setor	22
2.2.	Ambiente de Contratação Regulada	22
2.3.	Ambiente de Contratação Livre	23
3	O Modelo de Previsão de Preço Atual	26
4	Teoria de Opções	29
4.1.	Conceito	29
4.2.	Derivativos no Mercado de Energia	29
4.2.1.	Opções	30
4.2.2.	Swaps	31
4.2.3.	Collars	33
4.3.	Preço das Opções	33
5	Algoritmos Genéticos	36
5.1.	Aspectos Gerais	36
5.2.	Representação	38
5.3.	Codificação e Decodificação	38
5.4.	Função de Avaliação	38
5.5.	Seleção	38
5.6.	Operadores Genéticos	39
5.6.1.	Reprodução	39
5.6.2.	Crossover	39
5.6.3.	Mutação	40
5.6.4.	Parâmetros da Evolução	41
6	Processos Estocásticos	43
6.1.	Movimento Geométrico Browniano	43
6.2.	Movimento de Reversão à Média	43
6.3.	Movimento de Reversão à Média com Saltos	45
7	Definição do Processo Estocástico para Representação do Preço	47
7.1.	Modelos Propostos de Processos Estocásticos	48
7.1.1.	Experimento 1: Histórico mensal	49
7.1.2.	Experimento 2: Histórico mensal sazonalizado	49
7.1.3.	Experimento 3: Histórico Semanal desde 2003 sazonalizado	50
7.1.4.	Experimento 4: Histórico Semanal desde 2005 sazonalizado	50
7.1.5.	Experimento 5: Série de preços de cada PMO	51

7.2. Parâmetros do algoritmo genético implementado	55
7.2.1. Representação do Cromossoma	55
7.2.2. Função de Avaliação	56
7.2.3. Restrições	57
7.2.4. Seleção	58
7.2.5. Operadores e parâmetros do AG	58
7.3. Resultado	58
7.4. Análises dos Experimentos	59
7.4.1. Teste de Convergência	60
7.4.2. Comparativo com o histórico	60
7.4.3. Comparativo com os PMOs	61
7.4.4. Histogramas	62
7.4.5. Erros	65
7.4.6. Análise do valor de compra de energia	66
8 Metodologia proposta para o Cálculo do Valor das Opções Reais por Simulação Monte Carlo e Algoritmos Genéticos	68
8.1. Módulo: Gerador e amostrado de números aleatórios	69
8.2. Módulo: Processo Estocástico para <i>Commodities</i>	69
8.3. Módulo: Algoritmo Genético	69
8.4. Regra de Decisão e Valor da Opção	71
8.5. Avaliação da Regra de Decisão	71
9 Estudos de Caso	73
9.1. Experimento “a”: Opção de compra com venda a PLD	73
9.1.1. Restrições do Preço	74
9.1.2. Resultados	74
9.2. Experimento “b”: Opção de compra com venda fixa	76
9.2.1. Restrições do Preço	77
9.2.2. Resultados	77
9.3. Resultado do valor das opções	78
10 Conclusão	80
10.1. Trabalhos Futuros	82
11 Referências Bibliográficas	83
12 Apêndice A	86
12.1. Processos Estocásticos	86
12.2. Processo de Markov	86
12.3. Processo de Wiener	86
12.4. Processo Generalizado de Wiener	87
12.5. Processo de Itô	88
12.6. Lema de Itô	88
12.7. Movimento Geométrico Browniano	89
12.8. Processo de Reversão à Média	90
12.9. Modelo de Reversão à Média de Schwartz	92
12.10. Modelo de Reversão à Média de Dias	94
13 Apêndice B	96

Lista de Figuras

Figura 1 – Benefício Presente x Benefício Futuro	27
Figura 2– Estrutura básica de um Algoritmo Genético	37
Figura 3 – Regra da Roleta	39
Figura 4 – Operador de <i>Crossover</i> de um ponto	40
Figura 5 – Operador de Mutação	41
Figura 6 – Série histórica do PLD no Submercado Sudeste/Centro-Oeste.....	47
Figura 7 – Formação da matriz “PMOs ajustado”	53
Figura 8 – Continuação da formação da matriz “PMOs ajustado”	54
Figura 9 – Cromossoma.....	55
Figura 10 - Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelos Newave de Janeiro/09	63
Figura 11- Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelos “PMOs ajustado” de Janeiro a Dezembro/09	63
Figura 12 - Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelo MRM do experimento 2	64
Figura 13 - Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelo MRM do experimento 3	64
Figura 14 - Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelo MRM do experimento 4	64
Figura 15 - Histograma dos cenários de 12 meses gerados pelo MRM do experimento 5	64
Figura 16 – Metodologia Proposta	68
Figura 17 - Cromossoma.....	69
Figura 18 - Curva de gatilho e caminho do preço da <i>commodity</i>	71
Figura 19 - Regra de Decisão ótima da opção para o Experimento “a” ...	76
Figura 20 - Regra de Decisão ótima da opção para o Experimento “b” ...	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Matriz de histórico completo mensal	49
Tabela 2 – Matriz de histórico mensal no período úmido	49
Tabela 3 - Matriz de histórico mensal no período seco	49
Tabela 4 - Matriz de histórico semanal no período úmido.....	50
Tabela 5 - Matriz de histórico semanal no período seco	50
Tabela 6 - Matriz de histórico semanal no período úmido.....	51
Tabela 7 - Matriz de histórico semanal no período seco	51
Tabela 8 - Séries do PMO de Janeiro de 2003	52
Tabela 9 – Séries do PMO de Fevereiro de 2003	52
Tabela 10 – Séries do PMO de Março de 2003	52
Tabela 11 – Séries do PMO de Dezembro de 2010.....	53
Tabela 12 – Matriz “PMOs ajustado” para o período úmido.....	54
Tabela 13 – Matriz “PMOs ajustado” para o período seco	54
Tabela 14 – Parâmetros dos processos de reversão à média indicadas pelo GA	59
Tabela 15 – Teste de convergência (histórico).....	60
Tabela 16 - Teste de convergência (PMOs).....	61
Tabela 17 – Valor Médio dos Erros	65
Tabela 18 – Valor esperado dos contratos.....	67
Tabela 19 - VPL das opções para o Experimento “a”	75
Tabela 20 - VPL das opções para o Experimento “b”	78

Lista de Símbolos e Abreviações

Ct – Valor da opção de compra na data de vencimento T
K – Preço de exercício
dz – Incremento de Winer
exp (-rt) – Taxa de desconto
Pe - Preço de Exercício
Pv - Preço de Venda = PLD
Pm - Premio pela opção
s = σ - volatilidade
S – Preço do ativo objeto
St – Preço do ativo objeto na data de vencimento T
S0 – Preço atual do ativo objeto
 τ – Tempo que falta para expiração da opção
 μ - Taxa de desconto ajustada ao risco
T – Data de vencimento da opção
 $v = \eta$ = velocidade de reversão a média
X – Preço de exercício da opção
ACR – Ambiente de Contratação Regulada
ACL – Ambiente de Contratação Livre
ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCVE – Contrato de Compra e Venda de Energia
CMO – Custo Marginal de Operação
CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
GA – Algoritmo Genético
MGB – Movimento Geométrico Browniano
MRM – Movimento de Reversão a Média
ONS – Operador Nacional do Sistema
PMO – Programa Mensal de Operação
PLD – Preço de Liquidação de Diferença
TIR – Taxa interna de retorno
TUSD – Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
VPL – Valor Presente Líquido