



Fabio Rodrigo Siqueira Batista

**Estimação do Valor Incremental do Mercado de
Carbono nos Projetos de Fontes Renováveis de Geração
de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem pela Teoria
das Opções Reais**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: José Paulo Teixeira

Co-orientador: Albert C. Geber de Melo

Rio de Janeiro

Março de 2007



Fabio Rodrigo Siqueira Batista

**Estimação do Valor Incremental do Mercado de
Carbono nos Projetos de Fontes Renováveis de Geração
de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem pela Teoria
das Opções Reais**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Paulo Teixeira
Orientador
DEI/PUC-Rio

Prof. Albert Cordeiro Geber de Melo
Co-orientador
UERJ/CEPEL

Prof. Tara Keshar Nanda Baidya
PUC-Rio

Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão
PUC-Rio

Profª. Maria Elvira Piñeiro Maceira
UERJ/CEPEL

Prof. Paulo Roberto de Holanda Sales
UERJ/ELETOBRÁS

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de março de 2007

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

Fabio Rodrigo Siqueira Batista

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo em 1999. Obteve o título de Mestre em Ciências em Engenharia de Produção pela PUC-Rio em 2002. Participou de projetos PUC/Petrobrás sobre Opções Reais nos anos de 2000 e 2001, período no qual foi bolsista do CNPQ. Publicou artigos na área de Opções Reais em Petróleo e Precificação de Esquemas de Hedge para Carteiras de Usinas de Geração de Energia Elétrica. Desde 2001 trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) como analista de negócios na área de geração e transmissão de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

Batista, Fabio Rodrigo Siqueira

Estimação do Valor Incremental do Mercado de Carbono nos Projetos de Fontes Renováveis de Geração de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem pela Teoria das Opções Reais / Fabio Rodrigo Siqueira Batista; orientador: José Paulo Teixeira; co-orientador: Albert Cordeiro Geber de Melo. – 2007.

199 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Avaliação de projetos. 3. Opções reais. 4. Simulação de Monte Carlo. 5. Fontes renováveis de energia. 6. Mercado de carbono. I. Teixeira, José Paulo. II. Melo, Albert Cordeiro Geber de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

À minha esposa Rosaura, a pessoa que, incondicionalmente,
me apoiou ao longo desses anos.

Agradecimentos

À minha esposa, aos meus pais e a minha irmã, pela eterna paciência durante os últimos quatro anos.

Aos professores José Paulo Teixeira e Albert Cordeiro Geber de Melo, pela orientação, amizade e confiança no meu trabalho.

Ao professor Tara Keshar Nanda Baidya, pela sinceridade nas suas opiniões e pela inestimável colaboração ao longo deste trabalho.

À PUC-Rio, pelo indispensável apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

Ao CEPEL, pelo apoio material, humano e financeiro disponibilizado para a realização deste trabalho.

Ao colega José Francisco Moreira Pessanha, do CEPEL/UERJ, pelas discussões e esclarecimentos sobre os métodos estatísticos empregados neste trabalho.

Aos colegas Débora Jardim e Vitor Duarte, pelas explicações e discussões sobre o modelo NEWAVE do CEPEL.

À Ana Cláudia Nioac de Salles, pelas grandes colaborações e ajuda no entendimento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto.

À Dilmar de Carvalho, pelas grandes contribuições para um entendimento mais amplo sobre a Teoria das Opções Reais.

Aos funcionários do DEI/PUC-Rio, em especial à Cláudia Teti, pelas dicas, amizade e paciência ao longo dos últimos anos.

Aos colegas Luiz Guilherme Marzano, Valk Luiz Castellani, Rodrigo Torres, Maria Luiza Lisboa, Leonardo Moraes, Roberto José Pinto, Renata Nogueira Francisco, Fernando Aiube, Giuliano Iório, Kátia Rocha e a todos os demais que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

À Deus por ter estado presente ao longo de toda a realização deste trabalho.

Resumo

Batista, Fabio Rodrigo Siqueira; Teixeira, José Paulo; Melo, Albert Cordeiro Geber de. **Estimação do Valor Incremental do Mercado de Carbono nos Projetos de Fontes Renováveis de Geração de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem Pela Teoria das Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2007. 199p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A recente entrada em vigor do Protocolo de Quioto e as pesadas multas impostas às empresas européias que não conseguirem reduzir as suas emissões de CO₂, fazem do mercado de carbono uma realidade na América Latina. O Brasil se destaca como um dos países de maior potencial para exportar créditos de carbono no mundo, em grande parte, devido ao seu potencial para produzir energia elétrica a partir de fontes renováveis. Entretanto, a real atratividade desse negócio ainda é desconhecida no âmbito do setor elétrico brasileiro, tanto pela dificuldade encontrada para se estimar a sua produção efetiva de créditos de carbono, quanto pelo não reconhecimento das flexibilidades gerenciais embutidas neste mercado. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver um arcabouço metodológico capaz de determinar o valor incremental do mercado de carbono nos projetos de geração de energia elétrica em sistemas hidrotérmicos interligados, tal como o sistema brasileiro. Para tanto as metodologias ACM0002 [1] e AMS-I.D [2], ambas aprovadas pelo Comitê Executivo do Protocolo de Quioto, serão empregadas no cálculo da linha de base desses projetos. Além disso, uma vez que o preço do crédito de carbono pode ser considerado uma variável aleatória, a Teoria das Opções Reais será utilizada para avaliar as flexibilidades gerenciais embutidas no negócio. A opção considerada é avaliada pelos métodos Binomial, dos Mínimos Quadrados, e de Grant, Vora & Weeks. Os processos estocásticos Geométrico Browniano e de Difusão com Saltos são utilizados para modelar o preço do crédito de carbono.

Palavras-chave

Avaliação de Projetos; Opções Reais; Simulação de Monte Carlo; Fontes Renováveis de Energia; Mercado de Carbono.

Abstract

Batista, Fabio Rodrigo Siqueira; Teixeira, José Paulo; Melo, Albert Cordeiro Geber de. **Estimation of the Carbon Market Incremental Payoff for Renewable Electric Generation Projects in Brazil: A Real Option Approach.** Rio de Janeiro, 2007. 199p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The recent ratification of the Kyoto Protocol and the heavy penalties imposed on the European firms not reducing their Greenhouse Gas emissions, make the Carbon Market a real asset for Latin America. In this context, Brazil appears as one of the biggest producers of Certified Emissions Reductions, mostly because of its potential to generate electricity power from renewable sources. Unfortunately, the real attractiveness of this business is still unknown in the Brazilian Electric Sector, mainly because of the difficulties in estimating the future production level of the emission reductions and because of the existence of some managerial flexibilities that usually are not recognized in this market. In this context, the main objective of this work is to develop a methodology to evaluate the incremental payoff of the carbon market on electricity generation projects of interconnected hydrothermal systems, such as the Brazilian System. The methodologies ACM0002 [1] and AMS-I.D [2], both approved by the Kyoto Protocol Executive Board, will be used to determine the baseline of these projects. Besides that, considering that the carbon price is a random variable, the Real Option Approach will be used to evaluate the embedded managerial flexibilities on this business. The considered real option may be evaluated by using the binomial tree, least square Monte Carlo and the Grant, Vora & Weeks methods. Both the Geometric Brownian Motion and the Jump Diffusion processes will be used to model the price of the emission reductions.

Keywords

Project Valuation; Real Options; Monte Carlo Simulation; Renewable Sources; Carbon Market.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	19
2 O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	25
2.1 Introdução	25
2.2 Estrutura Institucional do MDL	27
2.3 Gases de Efeito Estufa.....	29
2.4 Linha de base e Adicionalidade de um Projeto MDL.....	31
2.5 Ciclo de um Projeto MDL.....	35
2.6 Projetos de Pequena Escala	39
2.7 Riscos de um Projeto MDL.....	42
2.8 Modelos de Comercialização das RCEs	45
2.8.1 Modelo de Comercialização Unilateral	46
2.8.2 Modelo de Comercialização Bilateral	47
2.8.3 Modelo de Comercialização Multilateral	47
3 Planejamento da Operação Energética no Brasil	49
3.1 Aspectos Gerais	49
3.2 Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo no Brasil.....	53
3.3 Configuração do Sistema Interligado Nacional.....	59
4 Cálculo da Linha de Base de Projetos de Geração de Energia Elétrica no Brasil	63
4.1 Introdução	63
4.2 Metodologia ACM0002 - Projetos de Grande Escala	65
4.2.1 Fator de Emissão da Margem Operacional	67
4.2.2 Fator de Emissão da Margem Construtiva	74

4.3 Metodologia AMS-I.D. – Projetos de Pequena Escala	78
5 Instrumental e Metodologia Aplicada à Análise de Investimentos.....	80
5.1 Introdução	80
5.2 Aplicações da Teoria das Opções Reais.....	82
5.3 Métodos para a Avaliação de Opções Financeiras	85
5.3.1 Modelo Binomial.....	88
5.3.2 Método de Grant, Vora & Weeks (GVW).....	92
5.3.3 Método dos Mínimos Quadrados (LSM).....	97
5.4 Processos Estocásticos.....	103
5.4.1 Movimento Geométrico Browniano	105
5.4.2 Movimento de Difusão com Saltos	108
6 Estudo de Caso	116
6.1 Participação Brasileira e Latino-Americana no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo	116
6.2 O Potencial e o Incentivo Brasileiro às Fontes Alternativas de Energia.....	118
6.3 Descrição do Estudo de Caso	120
7 Resultados.....	125
7.1 Abordagem Metodológica Proposta	125
7.2 Análises de Convergência.....	129
7.2.1 Análise de Convergência do Método Binomial	131
7.2.2 Análise de Convergência do Método de GVW	133
7.2.3 Análise de Convergência do Método LSM	146
7.3 Resultados Numéricos	155
7.3.1 Resultados – Pequena Central Hidrelétrica A (PCH A).....	155

7.3.2 Resultados – Pequena Central Hidrelétrica B (PCH B)	164
7.3.3 Resultados – Eólica A	171
7.3.4 Resultados – Eólica B	174
8 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	176
9 Referências Bibliográficas	183
Apêndice A Compromisso de Redução ou Limitação Quantificada de Emissões	192
Apêndice B Fator de Emissão das Usinas Conectadas ao SIN que Utilizam Combustível Fóssil.....	193
Apêndice C Cronograma de Expansão do Sistema Interligado Nacional	195
Apêndice D Custo Computacional dos Métodos Binomial, LSM e de GVW.....	198

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição dos Projetos Registrados no Âmbito do MDL de acordo com o seu País Hospedeiro.....	27
Figura 2.2 – Adicionalidade de um Projeto MDL	32
Figura 2.3 – Ciclo de um Projeto MDL	36
Figura 2.4 – Preço e Volume dos Contratos Futuros Negociados na ECX.....	44
Figura 3.1 – Conseqüências Operativas de um Sistema Hidrotérmico	50
Figura 3.2 – Função de Custo Imediato e Função de Custo Futuro.....	51
Figura 3.3 – Decisão Ótima para o Uso da Água	52
Figura 3.4 – Configuração Prevista para o SIN ao final de 2015 Segundo os Estudos do PDEE 2006-2015	60
Figura 3.5 – Alternativa 1 para a Configuração do SIN ao final de 2015	61
Figura 3.6 – Alternativa 2 para a Configuração do SIN ao final de 2015	62
Figura 4.1 - Ilustração do Cálculo de λ_y para o Método OM Simples Ajustado	72
Figura 5.1 – Ilustração de uma Árvore Binomial de um Passo.....	89
Figura 5.2 – Curvas de Gatilho de uma Opção de Venda (Put) e uma Opção de Compra (Call) do Tipo Americana.....	93
Figura 5.3 – Representação Esquemática do Algoritmo de GVW.....	97
Figura 5.4 – Movimento Geométrico Browniano	107
Figura 7.1 - Fluxograma Simplificado do Algoritmo de Solução do Problema Proposto.....	126
Figura 7.2 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto	135

Figura 7.3 - Definição do Parâmetro “q” ao Longo do Tempo	136
Figura 7.4 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Fator de Emissão é Constante ao Longo do Tempo	137
Figura 7.5 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Número de Datas de Exercício Antecipado é Variado	138
Figura 7.6 – Horizonte de Exercício da Opção de Registrar o Projeto MDL no Comitê Executivo	139
Figura 7.7 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o MGB com Saltos Negativos é Considerado	140
Figura 7.8 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o MGB com Saltos Positivos e Negativos é o Processo Estocástico Considerado.....	141
Figura 7.9 – Comparação entre as Curvas de Gatilho de Diferentes Cenários de Incerteza Técnica Quando o MGB com Saltos é Considerado.....	142
Figura 7.10 – Curvas de Gatilho do Valor do Projeto Quando o Fator de Emissão é Constante e o Preço da RCE é Modelado Pelo MGB com Saltos.....	143
Figura 7.11 – Sensibilidade do Método de GVW Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas.....	145
Figura 7.12 – Sensibilidade do Método de GVW Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção.....	146
Figura 7.13 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas (MGB)	148
Figura 7.14 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção (MGB)	149
Figura 7.15 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Funções Base na Função de Continuação da Opção	150
Figura 7.16 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Trajetórias Simuladas (MGB com Saltos).....	151

Figura 7.17 – Sensibilidade do Método LSM Quanto ao Número de Datas de Exercício Antecipado da Opção (MGB com Saltos).....	152
Figura 7.18 - Comparação entre o Custo Médio das Gerações Térmica e Hidráulica no Horizonte 2006-2015	158
Figura 7.19 - Comparação entre os Níveis Médios de Geração e de Inflexibilidade das Usinas Termelétricas Conectadas ao SIN (2006-2015)	158
Figura 7.20 – Relação entre a Geração Produtora de RCEs e a Geração Total do Subsistema Elétrico (Alternativa 2 de Configuração do SIN)	160
Figura 7.21 – Comparação entre as Alternativas 1 e 2 de Configuração do SIN	161
Figura 7.22 – Relação entre a Geração Produtora de RCEs e a Geração Total do Subsistema Elétrico (Alternativa 1 de Configuração do SIN)	166
Figura 7.23 – Distribuição da Capacidade Térmica Média Instalada por Tipo de Combustível Utilizado (2006-2015)	166
Figura 7.24 – Comparação entre as Margens Operacional e Construtiva em cada Subsistema Elétrico do SIN	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Os Gases de Efeito Estufa e os seus Respective Potenciais de Aquecimento Atmosférico	31
Tabela 2.2 - Estimativa dos Custos de Transação por Etapas do Ciclo de um Projeto MDL.....	39
Tabela 2.3 - Estimativa dos Custos de Transação de um Projeto de Pequena Escala	41
Tabela 5.1 - Analogia entre uma Opção Financeira e a Opção de Registrar um Projeto MDL no Comitê Executivo	85
Tabela 6.1 - Impacto Financeiro da Venda de Carbono por Tipo de Tecnologia.....	119
Tabela 6.2 - Parâmetros Gerais dos Estudos de Caso	123
Tabela 7.1 – Viés das Estimativas Realizadas pelo Método Binomial ...	132
Tabela 7.2 - Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão Obtidas pelo Método de GVW.....	144
Tabela 7.3 – Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão Obtidas pelo Método LSM	147
Tabela 7.4 – Coeficientes de Variação das Estimativas de Menor Precisão Quando o Método LSM e o MGB com Saltos são Utilizados ..	151
Tabela 7.5 – Valor da Opção em Função do Processo Estocástico Empregado.....	153
Tabela 7.6 – Valor da Opção em Função dos Parâmetros da Distribuição da Amplitude dos Saltos	153
Tabela 7.7 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)	155
Tabela 7.8 – Cenários de Aplicação do Método OM DDA	157
Tabela 7.9 – Valor da Opção em Função do Cenário de Utilização do Método OM DDA (R\$ mil).....	157

Tabela 7.10 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Quando a Alternativa 2 de Configuração do SIN é Utilizada (R\$ mil)	159
Tabela 7.11 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Considerando o Cenário de Isenção de Impostos (R\$ mil).....	161
Tabela 7.12 – Valor da Opção em Função dos Custos de Transação do Empreendimento PCH A (R\$ mil).....	162
Tabela 7.13 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH A Quando o Preço da RCE segue um MGB com Saltos (R\$ mil)	163
Tabela 7.14 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento PCH A (%a.a.).....	164
Tabela 7.15 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil)	165
Tabela 7.16 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B Quando a Alternativa 2 de Configuração do SIN é Utilizada (R\$ mil)	167
Tabela 7.17 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B Considerando o Cenário de Isenção de Impostos (R\$ mil).....	168
Tabela 7.18 – Valor da Opção em Função dos Custos de Transação do Empreendimento PCH B (R\$ mil).....	169
Tabela 7.19 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento PCH B Quando o Preço da RCE segue um MGB com Saltos (R\$ mil)	170
Tabela 7.20 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento PCH B (%a.a.).....	170
Tabela 7.21 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA A no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil).....	171
Tabela 7.22 – Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA A Considerando Diferentes Cenários para o seu Desenvolvimento (R\$ mil)	173

Tabela 7.23 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento EÓLICA A (%a.a.).....	173
Tabela 7.24 - Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA B no Comitê Executivo do MDL (R\$ mil).....	174
Tabela 7.25 – Valor da Opção de Registrar o Empreendimento EÓLICA B Considerando Diferentes Cenários para o seu Desenvolvimento (R\$ mil)	175
Tabela 7.26 – Impacto da Comercialização das RCEs na TIR do Empreendimento EÓLICA B (%a.a.).....	175
Tabela D1 – Custo Computacional dos Métodos Binomial, LSM e de GVW(h:mm:ss).....	198
Tabela D2 – Custo Computacional dos Métodos Binomial e LSM Quando 2000 Cenários de Incerteza Técnica são Considerados (h:mm:ss).....	199

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AND – Autoridade Nacional Designada

BEN – Balanço Energético Nacional

CALL – Opção Americana de Compra

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

CIMGC – Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima

COP – Conferência das Partes

CQNUMC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática

DCP – Documento de Concepção do Projeto

ECX – European Climate Exchange

EOD – Entidade Operacional Designada

ERPA – Emission Reduction Purchase Agreement

EUA – Emission Units Allowances

FCF – Função de Custo Futuro

FCI – Função de Custo Imediato

GEE – Gases de Efeito Estufa

GVW – Grant, Vora & Weeks

GWP – Potencial de Aquecimento Atmosférico

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

LSM – Least Square Monte Carlo (Mínimos Quadrados)

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MGB – Movimento Geométrico Browniano

MME – Ministério de Minas e Energia

NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República

N/NE – Norte e Nordeste

N/NE/MM – Norte, Nordeste e Manaus-Macapá

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PDEE – Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica

PGE – Projeto de Grande Escala

PPE – Projeto de Pequena Escala

PROINFA – Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia

PUT – Opção Americana de Venda

RCE – Redução Certificada de Emissão

SIN – Sistema Interligado Nacional

SMC – Simulação de Monte Carlo

S/SE/CO – Sul, Sudeste e Centro-Oeste

S/SE/CO/AR – Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Acre-Rondônia

tCO₂e – Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente

TOR – Teoria das Opções Reais

VPL – Valor Presente Líquido