



**Denis Luis de Oliveira**

**Avaliação de Projeto de Cogeração a partir  
de Biomassa Florestal: Uma Abordagem pela  
Teoria de Opções Reais**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão

Rio de Janeiro  
Abril de 2012



**Denis Luis de Oliveira**

**Avaliação de Projeto de Cogeração a partir  
de Biomassa Florestal: Uma Abordagem pela  
Teoria de Opções Reais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Administração de Empresas da PUC-  
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo  
assinada.

**Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão**

Orientador

Departamento de Administração – PUC-Rio

**Prof. Leonardo Lima Gomes**

Departamento de Administração – PUC-Rio

**Prof. Carlos de Lamare Bastian Pinto**

UNIGRANRIO

**Prof<sup>a</sup> Fernanda Finotti Cordeiro Perobelli**

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

**Prof<sup>a</sup> Marta Corrêa Dalbem**

UNIGRANRIO

**Prof<sup>a</sup> Mônica Hertz**

Vice-Decana e Pós-Graduação do CCS

Rio de Janeiro, 02 de abril de 2012

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

### **Denis Luis de Oliveira**

Graduou-se em Administração de Empresas pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2009, tendo sido bolsista do Programa de Incentivo a Inovação em 2008 e bolsista de iniciação científica da FAPEMIG em 2008 e 2009. Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais pelo Departamento de Estatística da UFJF em 2009. Trabalhou por dois anos no Núcleo de Pesquisa em Energia e Infraestrutura da PUC-Rio, tendo colaborado em diversos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento e em consultorias nas áreas de finanças, opções reais e energia. Atualmente exerce a função de Analista de Mercado na Diferencial Comercializadora de Energia, executando atividades de: acompanhamento do mercado de energia elétrica, previsão de preços, controle interno e avaliação econômico-financeira de projetos.

### Ficha Catalográfica

Oliveira, Denis Luis de

Avaliação de projeto de cogeração a partir de biomassa florestal : uma abordagem pela teoria de opções reais / Denis Luis de Oliveira ; orientador: Luiz Eduardo Teixeira Brandão. – 2012.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2012.

Inclui bibliografia

1. Administração – Teses. 2. Biomassa. 3. Cogeração. 4. Opções reais. 5. Preço de energia elétrica. 6. Modelo de reversão à média com saltos e sazonalidade. I. Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. III. Título.

CDD: 658

## Agradecimentos

Aos meus pais, Vânia Oliveira e José de Arimatéa, que dedicaram a vida pela minha formação e abriram mão de parte dos seus desejos para realizarem meus sonhos. O amor pela família, simplicidade e a disposição de enfrentar novos desafios são valores que aprendi e carrego comigo. Agradeço pelas palavras de incentivo, por estarem sempre presentes e, nos momentos de dificuldade, terem demonstrado calma e segurança nos conselhos. Amo vocês!

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Prof. Brandão, que já nas primeiras semanas do curso “adotou” um desconhecido e decidiu ajudá-lo. Foram dois anos de intenso trabalho, ricas discussões e muito aprendizado. Sua humildade e busca incessante pelo conhecimento são qualidades a serem seguidas.

Aos meus colegas do NUPEI (Núcleo de Pesquisa em Energia e Infraestrutura), especialmente aos professores Leonardo Gomes, Marta Dalbem, Carlos Bastian e Mario Simões. Agradeço a paciência, as oportunidades e todos os ensinamentos. O carinho e a confiança fizeram de vocês a minha “família carioca”.

A Prof<sup>a</sup>. Fernanda Perobelli, pelas inúmeras discussões que contribuíram para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sua dedicação e presença serviram de incentivo na escolha do “caminho” das pesquisas.

Aos meus amigos, que durante a semana ajudaram a reduzir a distância de casa e me encorajaram a seguir nesta caminhada. Agradeço aos nossos encontros, sempre marcados por muitas risadas, que geraram experiências inesquecíveis e histórias eternas. Obrigado pela companhia e diversão. Tenho muito orgulho de fazer parte dessa *turma*.

Por fim, a AES, pela oportunidade de desenvolver o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento e pelo apoio financeiro concedido nestes anos, o que contribuiu para a elaboração desta pesquisa.

## Resumo

Oliveira, Denis Luis de; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. **Avaliação de Projeto de cogeração a partir de Biomassa Florestal: Uma abordagem pela Teoria das Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2012. 105 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca por fontes energéticas alternativas tornou-se questão crucial para o desenvolvimento econômico mundial, sendo a biomassa uma alternativa a ser considerada. Neste estudo analisamos o caso de uma indústria de chapas de fibras de madeira, na qual cavacos de madeira podem ser utilizados tanto como matéria prima quanto como combustível para geração de energia térmica. Neste segmento, durante o processo produtivo são gerados grandes volumes de resíduos florestais que podem ser usados como combustível. O objetivo do presente trabalho é determinar a viabilidade econômico-financeira de se instalar um processo de cogeração de energia tendo como combustíveis resíduos florestais e gás natural. Assumimos que os gestores possuem duas alternativas: usar os resíduos e gás na geração de energia, liberando os cavacos para produção de MDF e HDF ou empregar os resíduos florestais, gás natural e cavacos de madeira como combustível, comercializando o excedente de energia no mercado de curto prazo. A avaliação financeira foi baseada na Teoria das Opções Reais considerando a flexibilidade gerencial de selecionar otimamente o destino final dos cavacos de madeira (chapa de madeira ou energia) ao longo do tempo. Uma importante inovação do trabalho consiste na incorporação de fatores de sazonalidade na volatilidade do preço de energia, adaptando o processo estocástico as especificidades do mercado brasileiro. Foi considerada como incerteza o preço da energia (PLD) e adotou-se como base o Modelo Geométrico de Reversão a Média com Saltos de Clewlow, Strickland e Kaminski (2000). Os resultados indicam que a opção de comercializar o excedente de energia não é viável financeiramente e em média não agrega valor ao projeto.

## Palavras Chaves

Biomassa; cogeração; opções reais; preço de energia elétrica; modelo de reversão à média com saltos e sazonalidade.

## Abstract

Oliveira, Denis Luis de; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira (Advisor). **Avaliação de Projeto de cogeração a partir de Biomassa Florestal: Uma abordagem pela Teoria das Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2012. 105 p. MSc. Dissertation – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The search for alternative energy sources has become critical issue for the economic development of the world, and biomass is an alternative to be considered. In this study we analyze the case of a producer of wood fiber boards, in which wood chips may be either used as raw material for the wood boards or as fuel to generate energy. In this segment, the production process generates large volumes of forest residues that can be used as fuel. The objective of this study is to determine the economic feasibility of installing a cogeneration energy process fueled with forest residues and natural gas. We assume that managers have two alternatives: use residues and gas for heat energy generation, releasing the wood chips for the production of MDF and HDF, or use forest residues, gas and wood chips as fuel, selling the surplus energy in the short term market. The valuation was based on the Real Options Theory considering the managerial flexibility to select the optimal final destination of the wood chips (fiber board or energy) along time. One of the innovations of this work is the incorporation of seasonal factors in the energy price volatility, adapting the stochastic process to the specificities of the Brazilian market. The main uncertainty, energy price (PLD), was based on the Mean Reversion Model with Jumps of Clewlow, Strickland and Kaminski (2000). The results indicate that the option to sell the surplus power is not financially viable and on average adds no value to the project.

## Keywords

Biomass; cogeneration; real options; electricity price; model mean reversion with jumps and seasonality.

## Sumário

1	Introdução	12
1.1.	Objetivos	15
1.2.	Justificativa	17
1.3.	Estrutura da Dissertação	18
2	Referencial Teórico	20
2.1.	Teoria das Opções Reais	20
2.2.	Classificação das Opções Reais.	24
2.3.	Processos Estocásticos	26
2.3.1.	Modelo de Ornstein-Uhlenbeck	28
2.3.2.	Modelo 1 de Schwartz (1997)	30
2.3.3.	Modelo Misto de Difusão com Saltos	31
2.3.3.1	O modelo de reversão à média com saltos de Clewlow, Strickland e Kaminski (2000)	32
2.3.4.	Aplicações de Processos Estocásticos na Modelagem do Preço de Energia	34
2.4.	Aplicações da Teoria de Opções Reais no Setor de Energia	40
3	Biomassa na Geração de Energia	43
3.1.	Resíduos Florestais e a Cogeração	47
3.2.	Potencial do Brasil em gerar Resíduos Florestais	51
4	Setor Elétrico Brasileiro	55
4.1.	Formação do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD)	58
4.1.1.	Despacho econômico de geração – Sistemas Térmicos	58
4.1.2.	Despacho econômico de geração – Sistemas Hidrotérmicos	60
4.2.	Comercialização de energia no mercado brasileiro	63
4.2.1.	Ambiente de Contratação Regulado (ACR)	64

4.2.2. Ambiente de Contratação Livre	65
4.2.3. Autoprodução e comercialização de excedente	67
5 Premissas e modelagem da avaliação financeira de um projeto de cogeração de energia.	70
5.1. Investimento	74
5.2. Variáveis que impactam o Fluxo de Caixa	75
5.3. Fluxo de Caixa	77
5.3.1. Fluxo de Caixa Comercialização de Chapas	77
5.3.2. Fluxo de Caixa Comercialização de Energia	77
5.4. Modelagem da Incerteza	78
5.4.1. Série Histórica de PLD – Estatísticas Descritivas	78
5.4.2. Parâmetros do Modelo	80
5.4.3. Fatores de Sazonalidade	81
6 Resultados	84
7 Conclusão	92
8 Referências Bibliográficas	95

## Lista de Figuras

Figura 1 - Eficiência na conversão de energia	49
Figura 2 - Área plantada Eucalyptus e Pinus por Estado	52
Figura 3 - Evolução da área florestal de Eucalyptus e Pinus das empresas associadas à ABRAF (2000-2010)	53
Figura 4 - Comparação da produtividade florestal de coníferas e de folhosas no Brasil com outros países	54
Figura 5 – Organograma do Setor Elétrico Brasileiro	57
Figura 6 - Despacho por ordem de mérito e cálculo do CMO	59
Figura 7 – Desafios e decisões de um sistema hidrotérmico	61
Figura 8 - Funções de Custo Imediato, Futuro e o Mínimo Custo Total	61
Figura 9 - Ambientes de contratação de energia e seus agentes	64
Figura 10 - Comparação consumidor Cativo vs Mercado Livre	66
Figura 11 - Etapas do Procedimento de Acesso	68
Figura 12 – Cavaco de Madeira	70
Figura 13 – Processo Produtivo Chapas de Madeira	71
Figura 14 - Fluxo Atual de Produção (sem flexibilidade)	72
Figura 15 - Fluxo Proposto para a Produção (com flexibilidade)	73
Figura 16 – Série Histórica de PLD (Mar/2002 a Dez/2011)	78
Figura 17 – Média e desvio padrão do PLD por período de afluência	79
Figura 18– Efeitos dos Fatores Sazonais na estimação do PLD Gerador randômico desligado	83
Figura 19– Efeitos dos Fatores Sazonais na estimação do PLD Gerador randômico ligado	83
Figura 20 – PLD médio projetado para o período 2012-2021	85
Figura 21 – Valor presente máximo (opção de switch)	86
Figura 22 – Valor presente da Opção (alternativa de comercializar energia)	87

Figura 23- Valor presente líquido da Opção	87
Figura 24 – VPL da opção em função do PLD	88
Figura 25 –Opção vs. Investimento	89
Figura 26 - Número de vezes que a opção foi exercida	89
Figura 27 – Sensibilidade VPL opção	90
Figura 28 – Tornado de Sensibilidade	91

## Lista de Tabelas

Tabela 1– Comparação entre Opções Financeiras e Opções Reais	21
Tabela 2 - Processos estocásticos mais utilizados em avaliação de ativos	27
Tabela 3 - Térmicas no Brasil com combustível de Biomassa	45
Tabela 4 - Percentual Médio de Geração de Resíduos por Indústria	48
Tabela 5 – Número de Agentes inscritos na ANEEL	68
Tabela 6 – Principais características da fábrica (premissas)	71
Tabela 7 – Investimento necessário para a Cogeração e conexão à rede	74
Tabela 8 – Premissas para modelagem financeira	76
Tabela 9 – Análise mensal da média, desvio padrão e coeficiente de variação do PLD	80
Tabela 10 – Parâmetros estimados para o modelo	81
Tabela 11 – Fatores de sazonalidade mensal	82