



**Rafael Igrejas da Silva**

**Avaliação de Fontes Alternativas para Geração de Energia  
Elétrica a partir da Biomassa de Palha da Cana: uma  
Abordagem por Opções Reais.**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão

Co-orientador: Prof. Carlos de Lamare Bastian-Pinto

Rio de Janeiro  
Março de 2012



**Rafael Igrejas da Silva**

**Avaliação de Fontes Alternativas para Geração de Energia  
Elétrica a partir da Biomassa de Palha da Cana: uma  
Abordagem por 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. Carlos de Lamare Bastian-Pinto**

Co-orientador

UnigranRio

**Prof. Leonardo Lima Gomes**

Departamento de Administração – PUC-Rio

**Profa. Marta Corrêa Dalbem**

UnigranRio

**Prof<sup>a</sup>. Mônica Herz**

Vice-Decana de Pós-Graduação do CCS

Rio de Janeiro, 19 de março de 2012.

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

## **Rafael Igrejas da Silva**

Graduado em Ciências Econômicas pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2003). Experiência de 10 anos de mercado; tem atuado em projetos de pesquisa e consultorias a empresas, com foco em avaliação econômico-financeira de projetos.

### Ficha Catalográfica

Igrejas, Rafael

Avaliação de fontes alternativas para geração de energia elétrica a partir da biomassa de palha da cana: uma abordagem por opções reais / Rafael Igrejas da Silva ; orientador: Luiz Eduardo Teixeira Brandão ; co-orientador: Carlos de Lamare Bastian-Pinto. – 2012.

77 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. Palha de cana. 4. Cogeração. 5. Briquetes. 6. Fontes alternativas. 7. Opções reais. I. Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. II. Bastian-Pinto, Carlos de Lamare. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. IV. Título.

CDD: 658

À minha família e em especial aos meus pais e avós, pelo apoio incondicional para a concretização deste trabalho.

À Mariana, pelo estímulo e compreensão ao longo deste percurso.

## Agradecimentos

À Deus acima de tudo, por me fazer perseverar, pela oportunidade de adquirir cada vez mais conhecimento e por fazer grandes amigos ao longo do caminho.

À AES e ANEEL, cujo P&D contribuiu em auxílio financeiro e na escolha do tema para o desenvolvimento deste estudo.

À PUC-Rio, pelo auxílio concedido, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu orientador, professor Luiz Eduardo Brandão, a quem sempre serei grato pela generosidade com que me acolheu no Núcleo de Pesquisa em Energia e Infraestrutura (NUPEI), pela orientação motivadora, pelos desafios compartilhados e pela atenção com que sempre trata seus alunos e orientandos.

Ao meu co-orientador, professor Carlos Bastian-Pinto, pela paciência, pelas enriquecedoras discussões sobre finanças, a inestimável ajuda e pelo frequente incentivo ao meu desenvolvimento no meio acadêmico.

Ao professor Leonardo Lima Gomes, que me apresentou o Setor Elétrico e tão generosamente compartilhou seus conhecimentos e que me incentiva a continuidade no meio acadêmico.

À professora Marta Dalbem pelo apoio e grande incentivo nestes anos de Mestrado. Ao Adriano Dalbem, por suas contribuições à escolha do tema e mais uma vez demonstrar ser referência como executivo do setor de energia.

Aos professores da PUC-Rio, em especial Luiz Felipe Motta, Jorge Ferreira e Antonio Figueiredo que partilharam seu saber e contribuíram muito em minha busca por conhecimento.

Aos amigos Mario Simões, André Giudice, Daniel Souza, Marcio Assis, André Vidal, respectivamente doutorando e mestrandos do IAG que compartilharam comigo ótimos momentos ao longo desse período de estudo.

## Resumo

Silva, Rafael Igrejas; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira. **Avaliação de Fontes Alternativas para Geração de Energia Elétrica a partir da Biomassa de Palha da Cana: uma Abordagem por Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2012. 77p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As opções de geração de energia no Brasil de forma sustentável estão fortemente relacionadas às fontes de energia alternativa, em especial a biomassa. Neste estudo é analisada a viabilidade econômico-financeira de um projeto de recolhimento da palha da cana de açúcar em uma usina no Brasil que tem a flexibilidade de expandir a venda de energia, ao investir na utilização da palha como insumo na cogeração. O preço da energia elétrica é modelado como um processo geométrico de reversão à média e é aplicada a teoria de opções reais para determinar o valor das flexibilidades gerenciais. Uma vez que a decisão de recolhimento da palha é tomada, a empresa tem a opção de investir na produção de briquetes, e a partir daí, realizar o *switch* entre o fluxo de caixa da energia e o fluxo de caixa de briquetes. O modelo é então resolvido utilizando uma árvore binomial recombinante não censurada de reversão à média. Os resultados indicam que a flexibilidade de escolher entre a venda de energia e a venda de briquetes agrega R\$ 9,7 milhões, ou 38% ao valor do projeto determinístico de R\$ 25,6 milhões, o que é significativo, considerando que a cogeração não é a atividade principal da usina de cana. Assim, o recolhimento da palha da cana pode ainda incentivar projetos de *retrofit* em usinas que de outra forma poderiam não se mostrar viáveis.

## Palavras- Chave

Biomassa; palha da cana; cogeração; briquetes; fontes alternativas; opções reais.

## Abstract

Silva, Rafael Igrejas; Brandão, Luiz Eduardo Teixeira (Advisor). **Alternative Energy Sources: a Real Option Valuation of Cogeneration with Sugarcane Trash Biomass.** Rio de Janeiro, 2012. 77p. MSc. Dissertation – Departamento de Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Options for sustainable power generation at competitive prices in Brazil are strongly related to alternative energy sources, in particular, sugar cane biomass. In this study we analyze a cane trash recovery project for a sugarcane mill in Brazil that has the option to expand sales of surplus bioelectricity by introducing the sugarcane trash as feedstock for cogeneration. We model electricity prices as a geometric mean reverting process, and apply the real options approach to determine the value of this managerial flexibility. Once the decision to recover the cane trash has been made, the firm has the option to invest in briquetting production, that will allow it to switch between energy and briquette sales depending on the relative prices of energy and briquettes. The model is then solved using a non censored binomial mean reverting lattice. The results indicate that the flexibility to choose between energy and briquette production adds R\$ 9.7 million in value, or 38% to the project value of R\$ 25.6 million, which is significant, considering cogeneration is not the core business of the sugarcane mill. This indicates that recovery of cane trash, which is currently wasted in the field, may represent a significant source of value for further development of bioelectricity cogeneration or briquetting production, when retrofitting older sugarcane mills.

## Keywords

Biomass; cane trash; cogeneration; briquetting; renewable energy source; real options.

## Sumário

1	Introdução	14
2	Referencial Teórico e Revisão de Literatura	18
2.1.	Referencial Teórico	18
2.1.1.	Valor Presente Líquido e Método do Fluxo de Caixa Descontado	18
2.1.2.	A Teoria de Opções Reais	20
2.2.	Revisão de Literatura	23
3	A Biomassa como Fonte de Energia Alternativa	27
3.1.	Breve Histórico do Setor Elétrico Brasileiro	27
3.2.	Participação da Biomassa na Matriz Energética Brasileira	28
3.3.	O Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar	31
3.4.	A Cogeração Utilizando a Biomassa da Cana de Açúcar	36
3.5.	A Biomassa para Produção de Briquetes	38
4	Metodologia	41
4.1.	O Modelo Teórico	41
4.1.1.	Processos Estocásticos	41
4.1.2.	Determinação do Processo Estocástico	43
4.1.3.	Modelos de Reversão à Média	44
4.2.	Análise de Incertezas e Definição de Parâmetros	49
4.2.1.	Modelagem do Preço da Energia Elétrica	50
4.3.	O Modelo Proposto de Aproveitamento da Palha para Fins Energéticos	55

4.3.1. Premissas do Projeto	56
4.3.2. Custo de Capital do Projeto	58
4.3.3. As Opções Reais Avaliadas para o Projeto	60
5 Os Resultados do Modelo	64
6 Conclusões e Recomendações	69
7 Referências Bibliográficas	71

## Lista de figuras

Figura 1 – Partes da Cana de Açúcar	32
Figura 2 – Principais Opções de Conversão da Biomassa	33
Figura 3 – Enfardadeira de Palha	35
Figura 4 – Palha Enfardada	37
Figura 5 – Carregamento da Palha	35
Figura 6 - PLD – Preço Spot de Energia no Brasil	50
Figura 7 - Regressão das Séries de Retornos do PLD	54
Figura 8 - Disponibilidade da Palha da Cana	56
Figura 9 – Modelo Determinístico por Árvore Binomial	65
Figura 10 – O Modelo da Opção de Investir	65
Figura 11 – O Modelo de Opção de Switch no DPL	66
Figura 12 – Valor do Projeto com Opção	67
Figura 13 – Análise de Sensibilidade da Volatilidade da Energia	68
Figura 14 – Análise de Sensibilidade do Preço da Energia	68

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Teste de Raiz Unitária ADF	51
Tabela 2 - Teste de Estacionariedade KPSS	52
Tabela 3 - Parametros para $S_E$	54
Tabela 4 – Principais Premissas do Projeto	57
Tabela 5 – Custo de Capital do Projeto	60

## Lista de siglas e abreviaturas

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEM - Balanço Energético Nacional

BIG - Banco de Informações de Geração

CALL – Opção de Compra

CAPEX – *Capital Expenditures*

CAPM – *Capital Asset Pricing Model*

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa

CHP – *Combined Heat and Power*

CMO - Custo Marginal de Operação

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira

DPL – *Decision Programming Language*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FCD – Fluxo de Caixa Descontado

GEE – Gases do Efeito Estufa

GW - Gigawatt

GJ - Gigajoule

IGPM – Índice Geral de Preços do Mercado

IR – Imposto de Renda

kWh – kilowatt hora

kWh/tc – kilowatt hora por tonelada de cana

LFT - Letra Financeira do Tesouro

MAD - *Market Asset Disclaimer*

MAE - Mercado Atacadista de Energia Elétrica

MAB - Movimento Aritmétrico Browniano

MGB – Movimento Geométrico Browniano

MME – Ministério de Minas e Energia

MRM – Movimento de Reversão à Média

MW - Megawatt

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

OU – Movimento de Reversão a Média Aritmética ou *Ornstein-Uhlenbeck*

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PLD - Preço de Liquidação das Diferenças

PNE - Plano Nacional de Energia

RE-SEB - Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro

ROI – *Return On Investment*

SEB – Setor Elétrico Brasileiro

SIN – Sistema Interligado Nacional

TIR – Taxa Interna de Retorno

TOR – Teoria das Opções Reais

UNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar

VPL – Valor Presente Líquido

WEC - *World Energy Council*

WWEA – *World Wind Energy Association*