



**APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS NA ANÁLISE  
DE INVESTIMENTO EM GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DE MADEIRA DE EUCALIPTO**

**ALBERTO PEREIRA DE SOUZA**

**TESE DE DOUTORADO  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**TESE DE DOUTORADO**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS NA ANÁLISE  
DE INVESTIMENTO EM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
A PARTIR DE MADEIRA DE EUCALIPTO**

**ALBERTO PEREIRA DE SOUZA**

**ORIENTADOR: ÁLVARO NOGUEIRA DE SOUZA**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.TD-075/2017**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2017**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

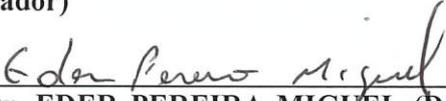
“APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS NA ANÁLISE DE  
INVESTIMENTO EM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE  
MADEIRA DE EUCALIPTO”

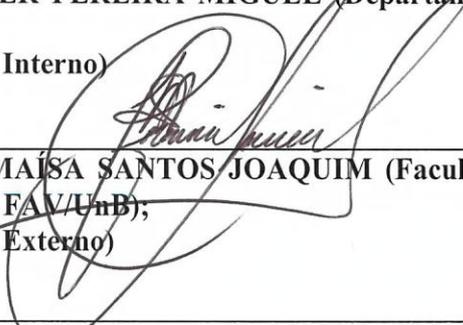
ALBERTO PEREIRA DE SOUZA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

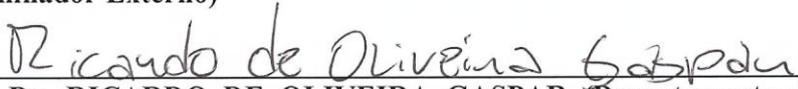
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. ÁLVARO NOGUEIRA DE SOUZA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. EDER PEREIRA MIGUEL (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. MAÍSA SANTOS JOAQUIM (Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB);  
(Examinador Externo)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. GILCIANO SARAIVA NOGUEIRA (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM);  
(Examinador Externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. SIDNEY ARAÚJO CORDEIRO (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM);  
(Examinador Externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. RICARDO DE OLIVEIRA GASPARGASPAR (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 21 de fevereiro de 2017.

## FICHA CATALOGRÁFICA

PAL334      Pereira de Souza, Alberto  
a              Aplicação da Teoria de Opções Reais na Análise de  
Investimento em Geração de Energia Elétrica a partir  
de Madeira de Eucalipto. / Alberto Pereira de  
Souza; orientador Álvaro Nogueira de Souza. --  
Brasília, 2017.  
113 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências  
Florestais) -- Universidade de Brasília, 2017.

1. Cavacos de eucalipto. 2. Biomassa. 3.  
Termelétrica. I. Nogueira de Souza, Álvaro, orient.  
II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, A. P. (2017). Aplicação da Teoria de Opções Reais na Análise de Investimento em Geração de Energia Elétrica a partir de Madeira de Eucalipto. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação. PPGEFL.TD-075/2017, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 113p.

### **PPGEFL.TD-075/2017**

#### **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Alberto Pereira de Souza

TÍTULO: Aplicação da Teoria de Opções Reais na Análise de Investimento em Geração de Energia Elétrica a Partir de Madeira de Eucalipto

GRAU: Doutor

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alberto Pereira de Souza  
Rua do Império, nº 81, apto nº 102, Jardim Imperial.  
39.100-000 Diamantina – MG – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS;

e a minha querida esposa Kátia Valéria,

sempre presente.

Aos meus pais,

meus filhos,

meus irmãos

e a toda a nossa grande família de que tanto me orgulho.

Ao meu orientador Álvaro Nogueira de Souza, por tudo.

Ao professor Humberto Angelo, pelo incentivo.

Ao meu sobrinho Wanderson Alex Gusmão, pela amizade e acolhimento.

A Rosa Vieira Rocha, uma mãe, sogra e avó muito especial, e Maria do Rosário Paranhos (Rosarina), avó de coração dos meus filhos, representando todos os amigos da grande família do senhor Reduzino Batista Afonso Fernandes que sempre estiveram juntos comigo.

Aos professores Reynaldo Campos Santana, Gilciano Saraiva Nogueira, José Sebastião Cunha Fernandes (UFVJM), Maísa Santos Joaquim (UnB) e Patrick Rousset (CIRAD), representando todos os professores que me incentivaram e colaboraram na realização deste doutorado.

Ao colega Rodolfo Neiva de Sousa, à minha sobrinha Maria Cecília Pereira de Faria e à minha filha Luana Maria Rocha Pereira de Souza pelas traduções, contribuições e correções de texto.

Aos Xavier Dominique Marie Chauvet, João Walter de Almeida Hugo (UFVJM) e Francisco Cesar Borges Silva (UnB), representando todos os colegas que sempre me apoiaram.

Aos senhores Ricardo Wagner Pinto Leite e Benone Magalhães Braga (APERAM BIOENERGIA), Ricardo Carvalho de Moura e Adenilcio Cavalini Custodio (GRUPO PLANTAR), Dárcio Calais (SINDIFER), Marcelo José de Almeida Hugo e Luiz Augusto Barcelos Almeida (CEMIG), Alexandre Roberto Martinelli e Afrânio Luís Ricci Lopes (CALDEMA), Francisco Olivati (De Smet EMPRAL), representando todos aqueles de suas organizações que incentivaram e colaboraram.

Enfim, à inesquecível **Universidade de Brasília**, pela oportunidade única.

Dedicada a:

À minha esposa Kátia Valéria.

Aos meus pais, Álvaro Pereira de Souza e Maria José Barbosa, minhas maiores referências.

Aos meus filhos Carlos Alberto, Luana, Álvaro e Marco Túlio.

Aos meus irmãos Renato, Eduardo, Jarbas, Rubens, Carolina, Carlos, Márcia, Fernando e Joaquim.

Às minhas noras Náíade, Jordana, Emanuelle, e aos meus netos Samuel, Clara e Sara.

Aos meus colegas Técnicos Administrativos da UFVJM.

Aos meus mestres e amigos, engenheiros florestais José Batuira de Assis e José Geraldo Rivelli Magalhães.

Aos amigos que partiram tão cedo, mas que teimam em continuar sempre ao meu lado, Maria da Consolação Afonsina Gusmão (Consola), José Antônio de Oliveira e Márcio Antônio Nunes Garcia.

Aos 49 anos, recém concluídos, comentei com D. Maria, minha mãe:

– Sinto que tenho em meu espírito 26 anos, e a senhora?

Ela, aos seus 83 anos, após refletir por uns momentos, respondeu: – eu também!

Hoje, aos 60, continuo me sentindo como se o tempo não tivesse passado.

Concluo que todos nós somos eternamente jovens...

Graças a DEUS!

**RESUMO**  
**APLICAÇÃO DA TEORIA DE OPÇÕES REAIS NA ANÁLISE DE**  
**INVESTIMENTO EM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE**  
**MADEIRA DE EUCALIPTO**

**Autor: Alberto Pereira de Souza**

**Orientador: Professor Doutor Álvaro Nogueira de Souza**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, fevereiro de 2017**

A utilização da madeira de eucalipto em termelétricas no Brasil é tema atual. Somam-se às discussões qual destinação dar aos cultivos de eucalipto caso a siderurgia brasileira a carvão vegetal passar a utilizar coque nos seus altos fornos e a possibilidade de produção de energia elétrica a partir da queima dos gases gerados no processo de carbonização da madeira. O objetivo deste trabalho foi concluir quanto à possível decisão sobre investir em duas termelétricas, especificamente, das decisões ter maior sustento com o uso da Teoria de Opções Reais. Na análise considerou uma termelétrica com potência de 100MW, movida a cavacos de madeira de eucalipto, e outra, com potência de 15MW, movida a gases gerados na carbonização e cavacos. Foi aplicado o método de quatro passos proposto por Copeland e Antikarov (2001). A volatilidade assumida para o projeto foi o desvio padrão do retorno logaritmizado de uma série de preços mensais de energia elétrica no mercado SPOT. Os Fluxos de Caixa Descontados (FCD) – assumidos como Ativos Subjacentes Sujeitos a Risco (ASSR) – e as Taxa Internas de Retorno (TIR) estimados foram, respectivamente, 557,175 milhões de reais e 97,645 milhões de reais, e 11,06% e 13,71%. Os valores das opções dado à incerteza do projeto foram de 87,01% em relação aos FCD, valores estes questionáveis sob a razoabilidade econômica. O estudo demonstrou a viabilidade econômica dos investimentos, que o uso da TOR deu maior sustento às análises, como também a necessidade de novos trabalhos para a correta precificação das opções reais quando a incerteza do projeto de uma termelétrica for assumida como a incerteza de preços de mercado SPOT.

**Palavras Chaves:** Cavacos de eucalipto, Biomassa, Termelétrica.

## **ABSTRACT**

### **APPLICATION OF REAL OPTIONS THEORY TO INVESTMENT ANALYSIS IN ELECTRIC ENERGY GENERATION FROM EUCALYPTUS WOOD**

**Author: Alberto Pereira de Souza**

**Advisor: Professor Álvaro Nogueira de Souza, PhD**

**Graduation Program in Forest Sciences**

**Brasilia, February, 2017**

The use of eucalyptus wood in thermoelectric plants in Brazil is a current subject. It complements to the discussion of the destination to be provided to eucalyptus culture in case Brazilian steel industry run by coal starts using coke in their blast furnaces and the possibility of producing electric energy from the burning of the gases generated by the wood carbonization. The objective of this paper is to take conclusions on the possible decision of investing in two thermoelectric plant, specifically of the decisions being more supported by the use of Real Options Theory. In this analysis a thermoelectric plant with 100MW power, run by eucalyptus woodchips and other with 15MW power, run by both woodchips and gases generated by carbonization, were considered. Copeland and Antikarov's (2001) four step method was applied. The volatility considered for this case was the standard deviation of the logarithm of the return of a series of monthly prices of electric energy in free market (SPOT). The estimated Discounted Cash Flow (FCD) - assumed as Underlying Asset Subject to Risk (ASSR) – and the Return Internal Rate were, respectively, 557.175 million reais and 97.645 million reais, and 11.06% and 13,71%. The option values attributed to the uncertainty of the Project were 87.01% in relation to FDC, those values being questionable under economical reasonability. This study showed the economical viability of investments, supported by the use of TOR, as well as the need of further studies to price correctly the real options when the uncertainty of the Project of the thermoelectric plant is assumed as the uncertainty of the SPOT Market prices.

**Key Words:** eucalyptus chips, biomass, thermoelectric.

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Hipótese .....</b>	<b>3</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 O SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1 Matriz de energia elétrica brasileira: situação atual e previsão .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2 O Futuro da geração atual de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 O atual modelo do setor elétrico brasileiro.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.4 Contratação de energia elétrica no Brasil.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 OS SETORES DE MADEIRA CULTIVADA E DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL; TERMELETRICAS MOVIDAS A BIOMASSA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1 O setor brasileiro de madeiras cultivadas .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Os principais usos da madeira de eucalipto no Brasil .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 Tecnologia de produção de madeira adotada pela indústria siderúrgica integrada no Brasil .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3.1 Inferências quanto à geração de energia elétrica a partir de cavacos de madeira de eucalipto cultivado para a produção de carvão .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.4 Tecnologia de produção de carvão vegetal adotada pela indústria siderúrgica integrada no Brasil.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4.1 Inferências quanto à geração de energia elétrica a partir de gases de carbonização e cavacos de madeira de eucalipto.....</b>	<b>24</b>

2.2.5	A geração de energia em termelétricas movidas a biomassa no Brasil..	25
2.2.6	Estudos pioneiros de geração de energia elétrica com biomassa com origem em cultivos florestais no Brasil .....	28
2.3	<b>TEORIA DAS OPÇÕES REAIS, ANÁLISE DE RISCO DE INVESTIMENTO E ESTUDOS RELACIONADOS COM OPÇÕES REAIS .....</b>	<b>29</b>
2.3.1	Teoria das Opções Reais.....	29
2.3.1.1	Opções Financeiras .....	29
2.3.1.2	Opções Reais.....	30
2.3.1.3	Processos estocásticos e a escolha para aplicações em Opções Reais.....	35
2.3.2	Análise de riscos em projetos de investimento.....	32
2.3.3	Metodologia para o cálculo do custo de capital – ANEEL.....	43
2.3.4	Alguns estudos internacionais relacionados com opções reais .....	46
2.3.5	Alguns estudos nacionais relacionados com opções reais .....	51
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1	Base de dados .....	53
3.2	Método de Análise.....	58
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
6	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>77</b>
7	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 01 – Capacidade instalada de geração renovável e não renovável em dezembro de 2014, e previsão para dezembro de 2024 .....	5
Tabela 02 – Capacidade instalada por fonte de geração em dezembro de 2014, e previsão para dezembro de 2024 .....	5
Tabela 03 – Consumo de carvão vegetal no Brasil, 2009 a 2014 (1.000MdC)...	22
Tabela 04 – Evolução do consumo de carvão vegetal pelos diferentes segmentos industriais em Minas Gerais, em mil metros de carvão (1000MdC).....	23
Tabela 05 – Analogias entre as Opções Financeiras e Opções Reais .....	32
Tabela 06 – Características de Ativos Financeiros e Ativos Reais .....	33
Tabela 07 – Taxonomia das Opções Reais .....	34
Tabela 08 – Unidade termelétrica, horas de geração, geração de energia total e líquida, consumo de madeira base seca e úmida (35% umidade), consumo de gases de carbonização e área cultivada necessária .....	55
Tabela 09 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre anual, valor da perpetuidade, Fluxo de Caixa Descontado, termelétrica 100MW .....	66
Tabela 10– Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre no período, com os respectivos valores presentes, termelétrica 100MW de potência .....	67
Tabela 11– Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre anual, valor da perpetuidade, Fluxo de Caixa Descontado, termelétrica 15MW.....	67
Tabela 12 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre no período, com os respectivos valores presentes, termelétrica 15MW de potência .....	68
Tabela 13 – Valores de recuperação pela venda de equipamentos para a opção de abandono (em R\$1.000,00), termelétrica 100MW de potência .....	71

Tabela 14 – Valores de recuperação pela venda de equipamentos para a opção de abandono (em R\$1.000,00), termelétrica 15MW de potência.....	71
---	----

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 01 – Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil - participação em 2014 .....	4
Figura 02 – Evolução da previsão da capacidade instalada por fonte de geração renovável, 2014 a 2024 .....	6
Figura 03 – Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro .....	9
Figura 04 – Comparação da produtividade florestal em m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de coníferas e de folhosas no Brasil, empresas associadas ao ABRAF, base 2012, com países selecionados .....	15
Figura 05 – Distribuição proporcional dos investimentos realizados pelas empresas associadas da ABRAF em 2012 .....	16
Figura 06 – Composição da área de árvores plantadas por segmento no Brasil, 2015 .....	17
Figura 07 – Plantio clonal de híbrido de <i>Eucalyptus spp</i> , com 2 e 5 anos de idade, na região de Curvelo – Minas Gerais, julho de 2012 .....	19
Figura 08 – Colheita com <i>Feller Buncher</i> . Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	19
Figura 09 – Madeira em processo de secagem. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	20
Figura 10 – <i>Skidder</i> para arraste dos fustes da área de colheita. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	20
Figura 11 – Garra traçadora para desdobramento dos fustes. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	20
Figura 12 – Detalhes do desdobramento dos fustes por garra traçadora. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	21
Figura 13 – Forno retangular e equipamento utilizado para a carga do forno. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais .....	24

Figura 14 – Participação de diferentes biomassas na geração termelétrica brasileira...	26
Figura 15 – Demonstração de como a flexibilidade e a incerteza afetam o valor de uma opção .....	35
Figura 16 – Curva de propensão, indiferença e aversão ao risco .....	39
Figura 17 – Abordagem geral do processo em quatro passos (COPELAND & ANTIKAROV, 2001) .....	58
Figura 18 – Árvore Binomial proposta por Cox, Ross & Rubinstein (1979) .....	61
Figura 19 – Preços em reais deflacionados de energia elétrica (PLD), intervalo temporal de setembro de 2006 a agosto de 2007 .....	61
Figura 20 – Valores que o FCD assumiu na Árvore de Eventos _ Termelétrica 100MW de potência ( em R\$1.000,00).....	69
Figura 21 – Valores obtidos na Árvore de Decisão empregando a abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco _ Projeto 15MW de potência (em R\$1.000,00.....	70
Figura 22 – Valores obtidos na Árvore de Decisão empregando a abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco _ Termelétrica 100MW de potência, com os respectivos valores de abandono (em R\$1.000,00).....	72
Figura 23 – Valores obtidos na Árvore de Decisão empregando a abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco _ Termelétrica 15MW de potência, com os respectivos valores de abandono (em R\$1.000,00) .....	73
Figura 24 – Fluxo de Caixa Livre unitário proporcional a cada MWh comercializado e Preços de Energia Elétrica (R\$.MWh <sup>-1</sup> ) do projeto de termelétrica de 15MW, intervalo temporal de setembro de 2006 a agosto de 2016 .....	75

# 1 INTRODUÇÃO

O futuro da atividade de produção de carvão vegetal para fins siderúrgicos guarda estreita relação com o seu custo. Sua participação está na ordem de 75% no custo final do ferro gusa (MME, 2009). As maiores siderúrgicas, que trabalham com produção integrada e normalmente operam fornos com alta produção (CGCC, 2014, 2015), têm como possibilidade a utilização de carvão mineral (coque) para redução do minério de ferro.

Em um cenário de substituição, a questão seria qual destinação dar às áreas cultivadas com eucalipto para a produção de carvão que abastece essas siderúrgicas, tanto quanto às áreas de propriedades destas empresas, como às áreas de propriedade de pequenos e médios produtores rurais. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), estas áreas somam na ordem de 1,1 milhões de hectares, 14% de área plantada com eucalipto no Brasil (IBÁ, 2016).

A geração de energia em termelétricas movidas a cavaco de madeira pode ser avaliada como uma opção para esses cultivos. Nos últimos leilões realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), as contratações de energia gerada em termelétricas movidas a cavacos de madeira já indicaram uma nova tendência para o setor de madeira cultivada. A maior oferta de energia elétrica decorreu da decisão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em adotar novos tetos de preços para esta fonte (EPE, 2013.a e b, 2014, 2015 e 2016).

Quanto à produção atual de carvão vegetal, pode-se creditar o seu alto custo relativo à subutilização do potencial da madeira no processo de carbonização. Para cada tonelada de madeira seca, na ordem de 34% a 40% são convertidas em carvão, na ordem de 40% são perdidos na forma de gases. Com base em madeira seca, para cada tonelada de carvão produzido, são geradas na ordem de 1,2 toneladas de gases condensáveis e não condensáveis, que, se queimados, produzem aproximadamente 73% de calor em relação ao calor produzido se realizada a combustão desta mesma tonelada de carvão (CETEC, 1980; BENITES *et al*, 2009; CGEE, 2015).

O calor gerado pela queima desses gases pode ser utilizado no processo de geração de energia elétrica (CALDEMA, 2016). Infere-se, portanto, como uma alternativa para agregar valor ao processo, tornando também, por conseguinte, o carvão vegetal mais competitivo.

Com foco em economia de escala, as grandes siderúrgicas já vêm concentrando a produção de carvão vegetal em grandes unidades de carbonização, e, por questões ambientais, os gases gerados já estão sendo direcionados para grandes fornalhas e queimados (CGCC, 2014, 2015). Estas já são ações fundamentais para a utilização de gases de carbonização para a geração de energia em termelétricas (CALDEMA, 2016).

Sob a ótica do capital, a geração de energia em termelétricas exige rigor proporcional ao montante de recursos necessários na análise de viabilidade. São previstos na ordem de cinco a seis milhões de reais por megawatt gerado, o que significa investimentos na ordem de R\$32,00 por MegaWatt hora comercializado (De Smet EMPRAL, 2016). E ainda, o sistema é exclusivo para o processo de geração de energia elétrica; o combustível apresenta maior custo relativo, o preço de comercialização de energia é altamente volátil e é realizada em um ambiente regulado (CCEE, 2016).

A Teoria das Opções Reais é uma abordagem moderna para o tema de investimento de capital. Vem somar às tradicionais metodologias porque considera o valor da incerteza e da flexibilidade gerencial na busca do resultado esperado do investimento (DIXIT & PINDYCK, 1995; BRASIL, 2007; SOUZA NETO, 2008).

Surgiu como uma analogia ao conceito de opções financeiras, um direito sem a obrigação de exercer a opção. Diferente de uma opção financeira que modela o direito de compra ou venda de um ativo financeiro, as opções reais refletem as várias alternativas que uma organização empresarial pode assumir ao analisar um projeto de investimento de capital (DEZEN, 2001).

De acordo com Kutilaka (1993), as técnicas de opções reais dão tratamento consistente aos riscos envolvidos na avaliação de projetos flexíveis porque tornam endógenas as regras de operação e capturam explicitamente a flexibilidade e seus efeitos sobre a incerteza. Trigeorgis (1995) estabeleceu uma metodologia clara e definida para a precificação de opções reais, assim como a definição das principais formas, geralmente encontradas nos projetos corporativos.

As opções, se exercidas, podem mudar radicalmente as decisões tomadas pelos executivos (COPELAND & ANTIKAROV, 2001). Para precificações de opções, estes autores propuseram um método de quatro passos que vem sendo amplamente difundido no meio

acadêmico (BASTIAN-PINTO, 2004 e 2009; SOUZA NETO, 2008; TATONI, 2012; JOAQUIM *et al*, 2015).

### **1.1 Objetivo**

Este trabalho analisou a aplicação da Teoria de Opções Reais, especificamente, a aplicação do modelo de quatro passos proposto por Copeland e Antikarov (2001), na análise de projetos de investimento em duas termelétricas, a primeira, movida a cavacos de madeira de eucalipto, e a segunda, em sistema de bicomustível, gases de carbonização e cavacos de madeira de eucalipto.

### **1.2 Hipótese**

A decisão sobre investir em uma termelétrica tem maior sustento com o uso da Teoria de Opções Reais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 - O SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

#### 2.1.1 Matriz de energia elétrica brasileira: situação atual e previsão

A geração de energia elétrica no Brasil se caracteriza pela predominância da utilização de fontes hídricas. As usinas hidrelétricas e as pequenas centrais hidrelétricas responderam por 65% da geração no ano de 2015 (Figura 01).

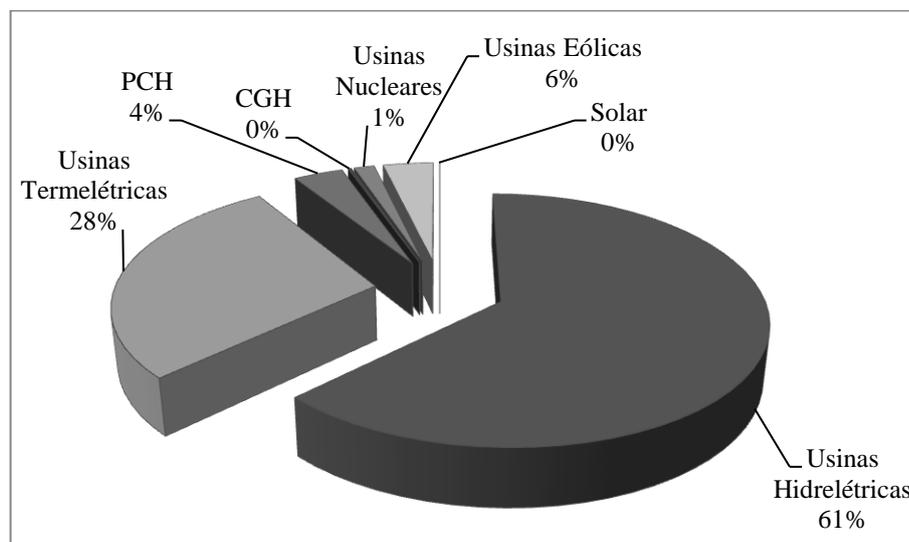


Figura 01 – Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil - participação em 2015

PCH: Pequena Central Hidrelétrica; CGH: Central Geradora Hidrelétrica.

Fonte: Adaptado do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016 (MME/EPE, 2015 -a).

Para o ano de 2024, foi previsto um acréscimo na capacidade instalada de geração no Brasil de 55,4%. Destaca-se neste horizonte, a diminuição da participação das usinas hidrelétricas (Tabela 01).

Tabela 01 – Capacidade instalada de geração renovável e não renovável em dezembro de 2014, e previsão para dezembro de 2024.

ANO	2014		2024		Variação (%)
	Participação (%)	Capacidade instalada (MW)	Participação (%)	Capacidade instalada (MW)	
<b>Renováveis</b>	<b>87,7</b>	<b>111.269</b>	<b>84,0</b>	<b>173.417</b>	<b>55,9</b>
Usinas hidrelétricas (*)	67,6	89.789	56,7	116.972	30,3
Outras (**)	16,2	21.480	27,3	56.445	162,8
<b>Não renováveis</b>	<b>16,3</b>	<b>21.609</b>	<b>16,0</b>	<b>33.030</b>	<b>52,9</b>
Uranio	1,5	1.990	1,6	3.395	70,6
Outras	14,8	19.619	14,5	29.635	51,1
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>132.878</b>	<b>100,0</b>	<b>206.447</b>	<b>55,4</b>

(\*) Incluído 7.000MW adquirido da Usina Itaipu, não consumido pelo sistema elétrico paraguaio.

(\*\*) Biomassa, solar, eólica e pequena central hidrelétrica.

Fonte: Adaptado do Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (MME/EPE, 2015 - b)

Nessa previsão, o aumento percentual da participação da energia eólica e da energia solar foi expressivo. O que não aconteceu em relação à participação da geração a partir da fonte de biomassa (Tabela 2).

Tabela 02 – Capacidade instalada por fonte de geração em dezembro de 2014, e previsão para dezembro de 2024.

ANO	2014		2024		Variação (%)
	Participação (%)	Capacidade instalada (GW)	Participação (%)	Capacidade instalada (GW)	
Hídrica (*)	71,7	95	60,5	125	31,6
Fóssil	14,8	20	14,3	30	50,0
Biomassa	8,3	11	8,7	18	63,6
Eólica	3,7	5	11,6	24	380,0
Nuclear	1,5	2	1,6	3	50,0
Solar	0,0	0	3,3	7	

(\*) Incluído 7GW adquirido da Usina Itaipu, não consumido pelo sistema elétrico paraguaio.

Fonte: Adaptado do Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (MME/EPE, 2015 - b).

Entretanto, os resultados dos leilões de energia a partir de 2013, onde a participação da fonte madeira foi relevante em relação aos anos anteriores (EPE, 2013.a e b, 2014, 2015 e 2016), podem impactar na decisão de considerar uma participação maior desta fonte na matriz de energia elétrica brasileira nos próximos Planos Decenais de Expansão de Energia.

## 2.1.2 O Futuro da geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil

Na Figura 02 pode ser observada a evolução da previsão de capacidade instalada por fonte de geração renovável no período de 2014 a 2024. As fontes alternativas tendem a ter maior participação na matriz de energia elétrica brasileira.

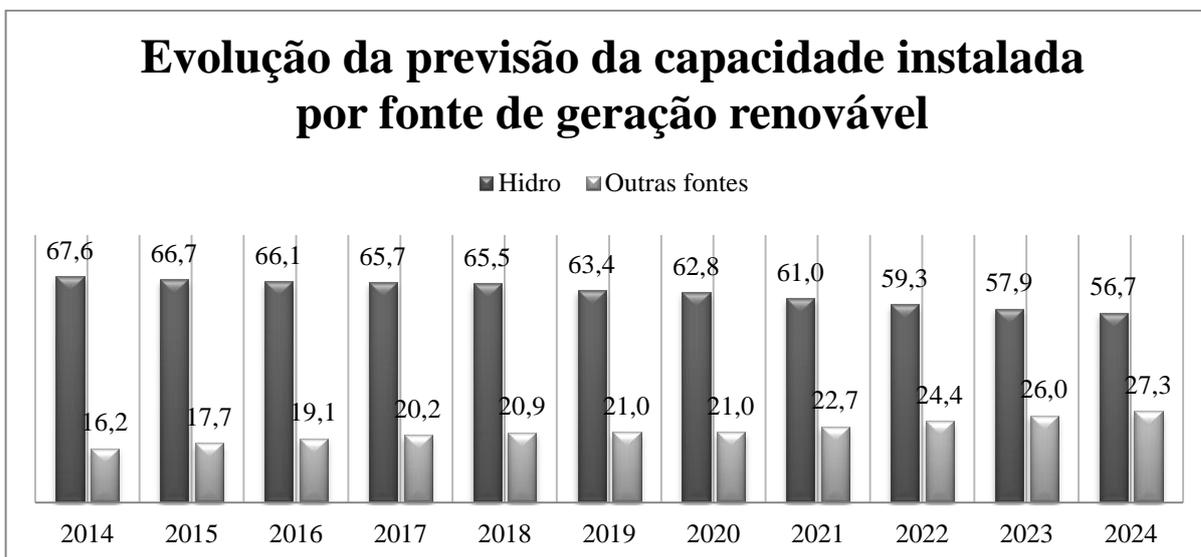


Figura 02 – Evolução da previsão da capacidade instalada por fonte de geração renovável, 2014 a 2024.

Fonte: MME/EPE, 2015 – b.

Neste contexto, abrem-se no Brasil novas possibilidades para a geração de energia com fonte de biomassa, hoje predominantemente gerada tendo como combustível o bagaço de cana, em sistema de cogeração. Conforme o Banco de Informações de geração, em outubro de 2016, dos 14.524MW de potência outorgada, 11.105MW, 76,5%, foram gerados com este insumo. A outorga da geração com resíduos de madeira e lenha como fonte energética somou nessa data somente 403MW (ANEEL, 2016 - a).

Já em um possível novo cenário, foram contratados entre 2013 e 2016, com previsão de entrega cinco anos após as contratações, 749,80 MegaWatts hora (MWh). Deste total, a capacidade outorgada de 728MWh corresponderam a 6 empreendimentos, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013.a e b, 2014, 2015 e 2016).

Como referência para esta ordem de grandeza de contratação de energia nova, em setembro de 2016 estavam em funcionamento 52 termelétricas movidas a cavacos de madeira, com potência outorgada de geração total de 403MWh, conforme já citado. Quando os novos

empreendimentos estiverem gerando, a participação da madeira passará a ser, portanto, equivalente a 57% da participação das usinas nucleares Angra I e II, na ordem de 2.000MWh (ANEEL, 2016).

A oferta de energia elétrica gerada em termelétricas movidas com esse insumo a partir de 2013 decorreu dos novos tetos de preços de energia elétrica adotados pela ANEEL para a fonte de biomassa. A energia gerada utilizando como combustível bagaço de cana e cavacos de madeira foi contratada no ano de 2013 na ordem de R\$135,00 o MWh. De 2014 a 2016, os preços variaram de R\$197,00 a R\$272,00 por-MWh (EPE, 2013.a e b, 2014, 2015 e 2016).

Preços nesses patamares estão coerentes com a perspectiva do mercado de energia elétrica futura. O Ministério de Minas e Energia (MME) previu o decréscimo da geração de energia hidrelétrica na matriz brasileira por meio das usinas hidrelétricas, historicamente mais baratas, de 67,6%, em 2014, para 56,7%, em 2024, conforme foi apresentado na Figura 2 (MME/EPE, 2015 - a). Em 2015, este percentual já foi de 61,9% (EPE, 2016). Os decréscimos da participação da energia hidrelétrica significam que fontes alternativas, entre elas a biomassa, tendem a ganhar relevância na matriz de energia elétrica brasileira.

### **2.1.3 O atual modelo do setor elétrico brasileiro**

Conforme o último Atlas de energia elétrica do Brasil, 3. Edição, publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica em 2008 (ANEEL, 2008):

- Foram realizadas importantes alterações no modelo do setor elétrico brasileiro com a promulgação da Lei n. 9427, de dezembro de 1996. Sua característica marcante foi iniciar um processo liberalizante neste setor. Por meio desta lei, foram criadas a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, o ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, e o MAE, Mercado Atacadista de Energia;
- A ANEEL, entidade autônoma vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), sucedeu o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Como responsável pela regulamentação e fiscalização do setor elétrico, tem o objetivo de atuar de forma a garantir a operação de todos os agentes em um ambiente de equilíbrio permitindo às companhias a obtenção de resultados sólidos ao longo do tempo, e, ao consumidor, a modicidade tarifária;

- O ONS, entidade também autônoma que substituiu o GCOI (Grupo de Controle das Operações Integradas, subordinado à Eletrobrás), tem a responsabilidade pela coordenação da operação das usinas e redes de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), portanto, de decidir quais usinas devem ser despachadas para o pleno fornecimento de energia elétrica. Para tanto, realiza estudos e projeções com base em dados históricos, presentes e futuros da oferta de energia elétrica e do mercado consumidor;
- O MAE passou a ter a responsabilidade quanto à coordenação da negociação da energia no mercado livre;
- Já em 2004, por meio das leis nº 10.847 e nº 10.848, manteve-se a formulação de políticas para o setor de energia elétrica como atribuição do Poder Executivo federal, através do Ministério de Minas e Energia (MME) e com assessoramento do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e do Congresso Nacional. Foram criados novos agentes, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao MME e com a função de realizar os estudos necessários ao planejamento da expansão do sistema elétrico, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que substituiu o MAE.

Na Figura 03 se reproduziu a atual estrutura institucional do setor elétrico brasileiro, conforme o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008).

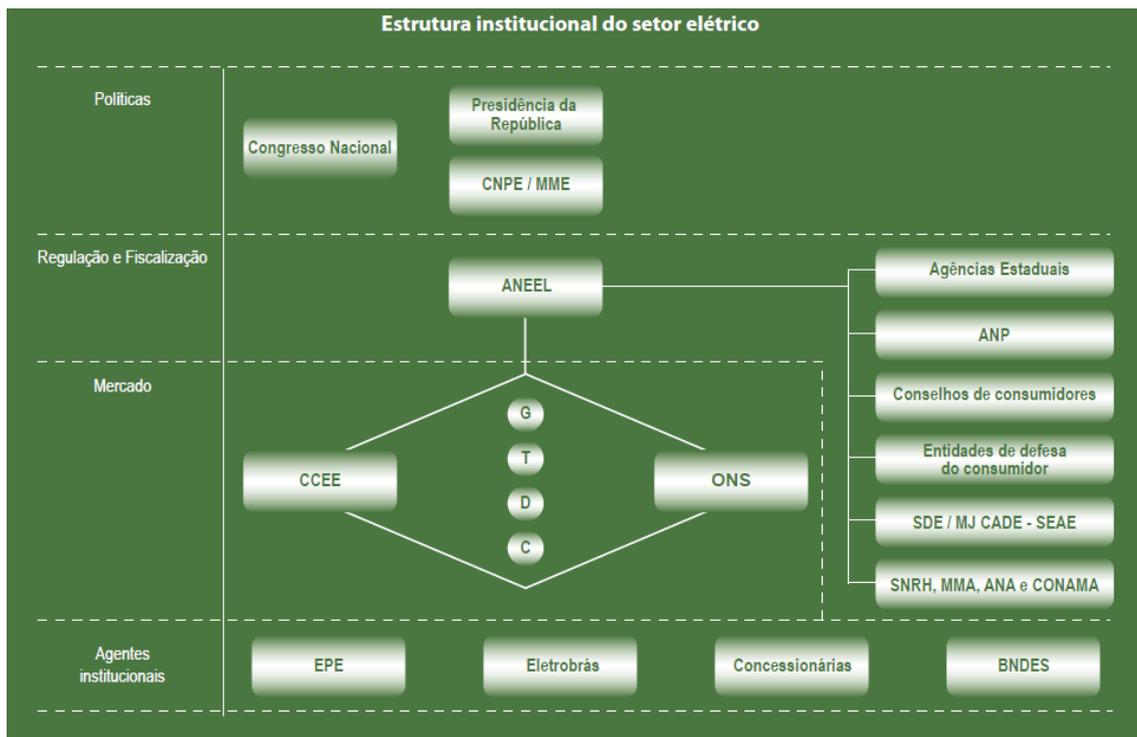


Figura 03 – Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro.

Fonte: Figura disponível no Atlas de energia elétrica do Brasil (ANEEL, 2008).

Ainda conforme o último Atlas de energia elétrica do Brasil (ANEEL, 2008):

- Quanto à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, houve duas importantes mudanças do setor desde 1990. A primeira, decorrente da Lei n. 9427/96, determinou que a exploração dos potenciais hidrelétricos fosse concedida por meio de concorrência ou leilão, em que o vencedor seria aquele que oferecesse o maior valor pela outorga. A segunda ocorreu com a introdução do novo modelo em 2004. Entre seus objetivos principais, estavam a segurança no suprimento, a promoção da modicidade tarifária e a promoção da inserção social, em particular, pelos programas de universalização de acesso à energia elétrica. Restringiu, mas não extinguiu o mercado livre, que em 2008 respondia por cerca de 30% da energia elétrica negociada no país, e mantiveram inalteradas, porém em permanente processo de aperfeiçoamento, as bases regulatórias da distribuição e transmissão;
- Nesse novo contexto, passou a vencer os leilões de energia o investidor que se dispusesse a oferecer o menor preço para a venda da produção elétrica das

futuras usinas; foi instituído para a comercialização de energia o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), exclusivo para geradoras e distribuidoras, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), onde participam geradoras, comercializadores, importadoras, exportadoras e consumidores livres;

- O modelo implantado em 1996 rompeu em parte com o controle estatal, sob o qual as atividades eram rigorosamente regulamentadas e as companhias operadoras controladas pelo estado, em um processo verticalizado, ou seja, atuavam na geração, transmissão e distribuição. Mantendo-se as atividades de distribuição e transmissão regulamentadas, a produção das geradoras passou a ser comercializada em um mercado livre. A reforma exigiu a cisão das companhias em geradoras, transmissoras e distribuidoras. As atividades de distribuição e transmissão continuaram totalmente regulamentadas. Porém a produção das geradoras passou a ser negociada no mercado livre onde as partes compradora e vendedora acertam entre si as condições através de contratos bilaterais.

#### **2.1.4 Contratação de energia elétrica no Brasil**

Conforme a Câmara de Comércio de Energia Elétrica (CCEE, 2016):

- A contratação de energia elétrica no Brasil é realizada no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e no Ambiente de Contratação livre (ACL) ou também chamado mercado livre;
- Participam do Ambiente de Contratação Regulada as distribuidoras, que como parte compradora, passaram a ser a única forma de contratar grande volume de suprimento de energia elétrica para o longo prazo. Como parte vendedora, estão as geradoras. As contratações de compra e venda de energia são realizadas por meio de leilões específicos. Elas têm o início de entrega variado, podendo ocorrer em um, três ou cinco anos após a data de realização do leilão e são chamados, respectivamente, de A-1, A-3 e A-5;
- As datas dos leilões são determinadas pelo MME e são realizados pela ANEEL através da CCEE. Por meio de portaria, é fixado o preço máximo para o MWh

a ser ofertado, de acordo com a fonte da energia. As geradoras entram em “pool”, ou seja, a oferta não é individualizada, e a prioridade de contratação é dada ao vendedor que pratica o menor preço;

- As duas principais modalidades dos leilões são para energia existente e energia nova. A primeira tem origem em usinas já em operação, cujos investimentos já foram amortizados e, portanto, possuem um menor custo. Os volumes contratados são entregues em um prazo menor, até um ano (leilões A-1). Os leilões de energia elétrica de empreendimentos existentes estão previstos no artigo 19 do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, com redações modificadas conforme o Decreto nº 5.271, de 16 de novembro de 2004, e o Decreto nº 5.499, de 25 de julho de 2005;
- A segunda refere-se à compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração, previstos nos parágrafos 5º ao 7º do art. 2º da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, com redação alterada conforme art. 18 da Lei nº 11.943, de 28 de maio de 2009, e nos artigos 19 a 23 do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. São eles os empreendimentos em processo de leilão das concessões e de usinas que já foram outorgadas pela ANEEL e estão em fase de planejamento ou construção. Neste caso, o prazo de entrega da energia contratada é geralmente de três ou cinco anos (leilões A-3 e A-5);
- Além dessas duas modalidades, há os leilões de ajuste e os de reserva. Nos primeiros, os leilões têm o objetivo de adequar a contratação de energia pelas distribuidoras, tratando os desvios consequentes da diferença entre as previsões feitas em leilões anteriores e o comportamento dos seus mercados. Por meio desses leilões, são realizadas contratações de curta duração, de três meses a dois anos. Estes leilões estão previstos no artigo 26 do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. A Resolução Normativa Aneel nº 411/2010 aprova o modelo de edital dos Leilões de Ajuste e delega a sua realização à CCEE;
- Nos segundos, as contratações de energia têm o objetivo de elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para esta finalidade, podendo ser de novos empreendimentos de geração ou de empreendimentos

existentes. A contratação ocorre por meio dos leilões conforme §3º do art. 3º e no art. 3º- A da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, os quais foram regulados pelo Decreto nº 6.353/2008. A energia de reserva é contabilizada e liquidada no mercado de curto prazo operado pela CCEE;

- Decorrente da estratégia de contratação de energia de reserva, foi criado o Encargo de Energia de Reserva (EER), com o objetivo de cobrir os custos, sejam administrativos, financeiros ou tributários que são rateados entre todos os usuários da energia de reserva, que conforme o Decreto nº 337/2008, são os agentes de distribuição, consumidores livres, consumidores especiais, autoprodutores, de acordo com a parcela da energia adquirida, agentes de geração com perfil de consumo e agentes de exportação participantes da CCEE;
- Também, há os leilões de fontes alternativas, instituídos com o objetivo de atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e aumentar a participação de fontes renováveis e energia proveniente de Pequenas Centrais Hidrelétricas na matriz energética brasileira. Estes leilões foram regulamentados por meio do Decreto nº 6.048, de 27 de fevereiro de 2007, o qual altera a redação do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004;
- Por último, há os leilões estruturantes, previstos pelo inciso IV do § 1º do art. 19 do Decreto nº 5.163, de 30/07/2004, com redação dada pelo Decreto nº 6.210, de 18/09/2007, e estão de acordo com a atribuição do CNPE prevista no inciso VI do art. 2º da Lei nº 9.478, de 06/08/1997, com redação dada pela Lei nº 10.848, de 15/03/2004. São destinados à compra de energia proveniente de projetos de geração indicados por resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e aprovados pelo presidente da República, considerando o planejamento de longo, médio e curto prazo. Têm o objetivo de assegurar a otimização da modicidade tarifária e confiabilidade do sistema elétrico. Os leilões estruturantes têm prioridade de licitação e implantação, em função de caráter estratégico e o interesse público;
- A segunda forma de contratação de energia elétrica no Brasil é por meio do Ambiente de Contratação livre (ACL) ou também chamado, mercado livre.

Neste mercado, vendedores e compradores negociam entre si as cláusulas dos contratos, como preço, prazo e condições de entrega. Da parte vendedora participam as geradoras enquadradas como Produtores Independentes de Energia (PIE). A parte compradora é constituída por consumidores com demanda superior a 0,5 MW (megawatt) que adquirem a energia elétrica para uso próprio. As transações geralmente são intermediadas pelas empresas comercializadoras, também constituídas a partir da década de 90, e que têm por função favorecer o contato entre as duas pontas e dar liquidez a esse mercado;

- Os prazos dos contratos podem chegar a vários anos. O comprador baseia-se em projeções de consumo, e o vendedor, nas projeções do volume que irá produzir, variando de acordo com as determinações do ONS. Nas duas pontas podem ocorrer diferenças entre o volume contratado e aquele movimentado. O acerto é realizado por meio de operações de curto prazo no mercado SPOT, abrigado pela CCEE. A cada mês, as partes equilibram as suas posições através da compra ou venda da energia elétrica. Os preços são fornecidos pelo programa Newave e variam para cada uma das regiões que compõem o SIN, de acordo com a disponibilidade de energia elétrica. Além de abrigar essas operações, a CCEE responsabiliza-se também pela sua liquidação financeira.

## 2.2 OS SETORES DE MADEIRA CULTIVADA E DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NO BRASIL; TERMELÉTRICAS MOVIDAS A BIOMASSA

### 2.2.1 O setor brasileiro de madeiras cultivadas

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016):

- O Brasil somou em 2015 uma área cultivada na ordem de 7,8 milhões de hectares. Desta, 5,6 milhões de hectares com árvores do gênero *Eucalyptus spp* e 1,6 milhões de hectares com o gênero *Pinus spp*. Da área cultivada com eucalipto, 34% e 14% estão associadas, respectivamente, à indústria de papel e celulose e à indústria siderúrgica a carvão vegetal;
- Em termos de magnitude econômica, em 2015, somente suas empresas associadas investiram R\$10,5 bilhões em florestas e unidades industriais. Deste valor, R\$4,5 bilhões na produção florestal. Empregaram diretamente 540 mil pessoas em 2015;
- Estimou-se que o desembolso total com salários decorrente da atividade florestal (considerando empregos diretos, indiretos e resultantes do efeito renda) tenha sido da ordem de 3,8 bilhões reais;
- Esta indústria foi responsável por R\$11,3 bilhões de reais em tributos federais, estaduais e municipais, o que correspondeu a 0,9% de toda a arrecadação brasileira em 2015.

Um aspecto positivo na ampliação da área cultivada com eucalipto para a geração de energia elétrica refere-se aos ganhos ambientais decorrentes de sequestro de carbono (NICHII *et al*, 2005; GATTO *et al*, 2010).

A IBÁ estimou, por exemplo, que os plantios florestais no Brasil já são responsáveis pelo estoque de aproximadamente 1,7 bilhão de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq), medida métrica utilizada para comparar as emissões dos vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um. Além das remoções e estoques de carbono das árvores plantadas, essa indústria já gera e mantém reservas de carbono da ordem de 2,48 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq e em 5,6 milhões de hectares na

forma de Reserva Legal (RL), Áreas de Proteção Permanente (APP) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) (IBÁ, 2016).

As tecnologias desenvolvidas já fazem o Brasil praticar os mais elevados Incrementos Médios Anuais (IMA) para os gêneros de *Eucalyptus spp* e *Pinus spp* no mundo. As condições de clima e solo, somada às políticas de investimento em pesquisa e desenvolvimento, a verticalização dos setores de base florestal e a qualidade de todos colaboradores envolvidos proporcionam uma maior produtividade por hectare conforme pode ser observado na Figura 04 (ABRAF, 2013).

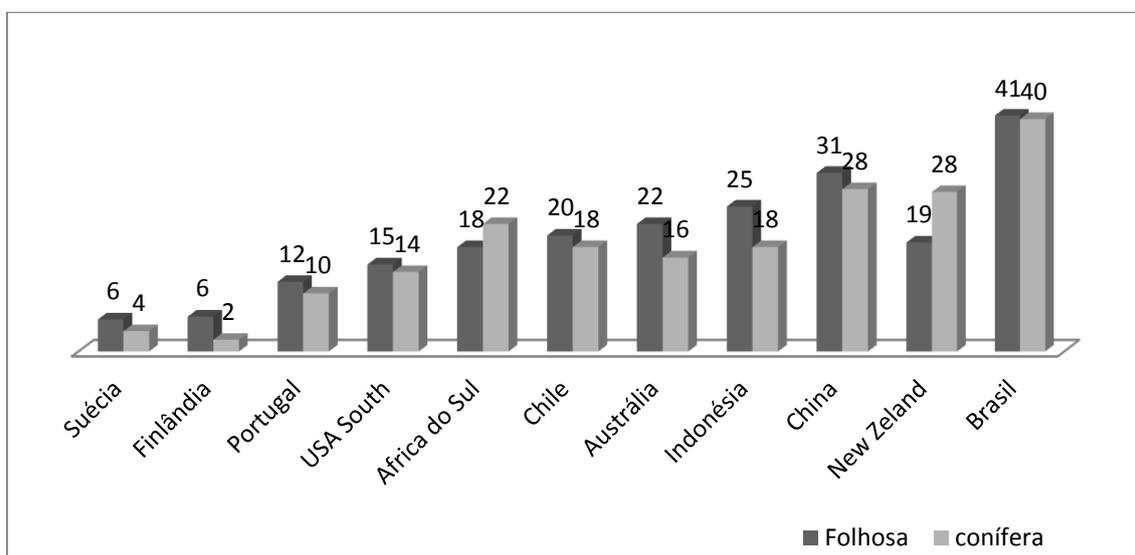


Figura 04 – Comparação da produtividade florestal em  $m^3ha^{-1}ano^{-1}$  de coníferas e de folhosas no Brasil, empresas associadas ao ABRAF, base 2012, com países selecionados.

Fonte: ABRAF, 2013.

Como uma referência de distribuição de investimentos na produção de madeira, pode ser observada na Figura 05 a composição média de custos em percentual, tendo como base as empresas associadas individuais da ABRAF em 2012 (ABRAF, 2013).

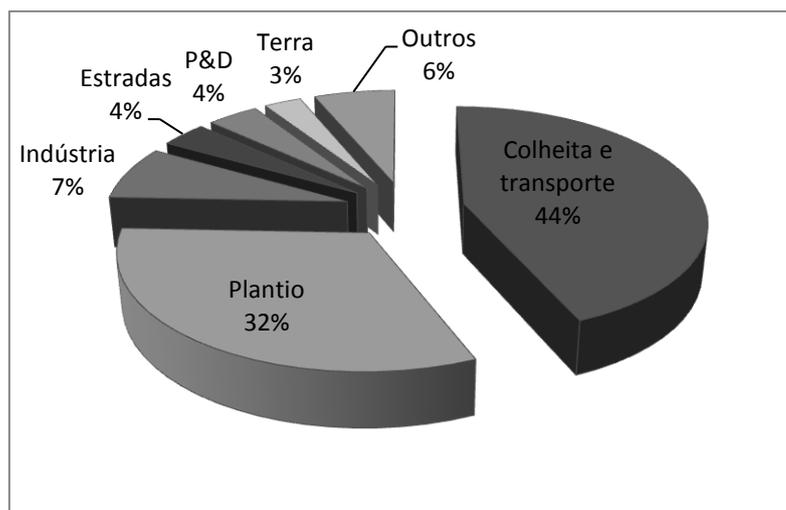


Figura 05 – Distribuição proporcional dos investimentos realizados pelas empresas associadas da ABRAF em 2012.

Fonte: ABRAF (2013).

Apesar de todas as condições de silvicultura e operacionais favoráveis, da importância dos setores de base florestal para o Brasil devido à sua relevância econômica e socioambiental, a competitividade dos produtos oriundos de florestas cultivadas está se deteriorando frente aos principais concorrentes internacionais. Tendo como parâmetro a indústria de celulose, um dos mais importantes setores de base florestal do país, no ano dois mil, o Brasil ostentava o status de menor custo internacional de produção de madeira cultivada para este setor. Doze anos após, foram perdidas quatro posições: os custos no Brasil foram mais caros do que os praticados na Rússia, Indonésia e Estados Unidos (ABRAF, 2013).

### 2.2.2 Os principais usos da madeira de eucalipto no Brasil

A introdução de espécies de eucalipto para cultivos comerciais no Brasil por Navarro de Andrade já faz mais de um século, precisamente, em 1904. O objetivo foi suprir a demanda da Cia Paulista de Estradas de Ferro do Estado de São Paulo de carvão e madeira para os dormentes. Décadas depois, o gênero *Eucalyptus spp*, originário da Austrália e da Indonésia e que reúne mais de 600 diferentes espécies, passou a ser utilizado, principalmente, para produção de lenha para energia, para a produção de papel e celulose e para a produção de carvão vegetal (MARTINI, 2004; ABRAF, 2013; VALE *et al*, 2014; FLORES, 2016).

O grande impulso para a cultura de eucaliptos no Brasil veio primeiro com a produção de carvão vegetal, a partir da década de 40. A Cia. Siderúrgica Belgo Mineira, para suprir seus

altos fornos, em uma iniciativa pioneira em Minas Gerais – e provavelmente no Brasil –, deu início a plantios com o objetivo de produção deste redutor de minério de ferro em 1949, no município de Santa Bárbara. Em seguida, foi vez da indústria de papel e celulose utilizar de forma intensiva o eucalipto, por volta de 1957 (AMS, 2015; BNDES, 2016; FLORES, 2016).

A composição da área de árvores plantadas por segmento no Brasil, em 2015, foi apresentada na Figura 06.

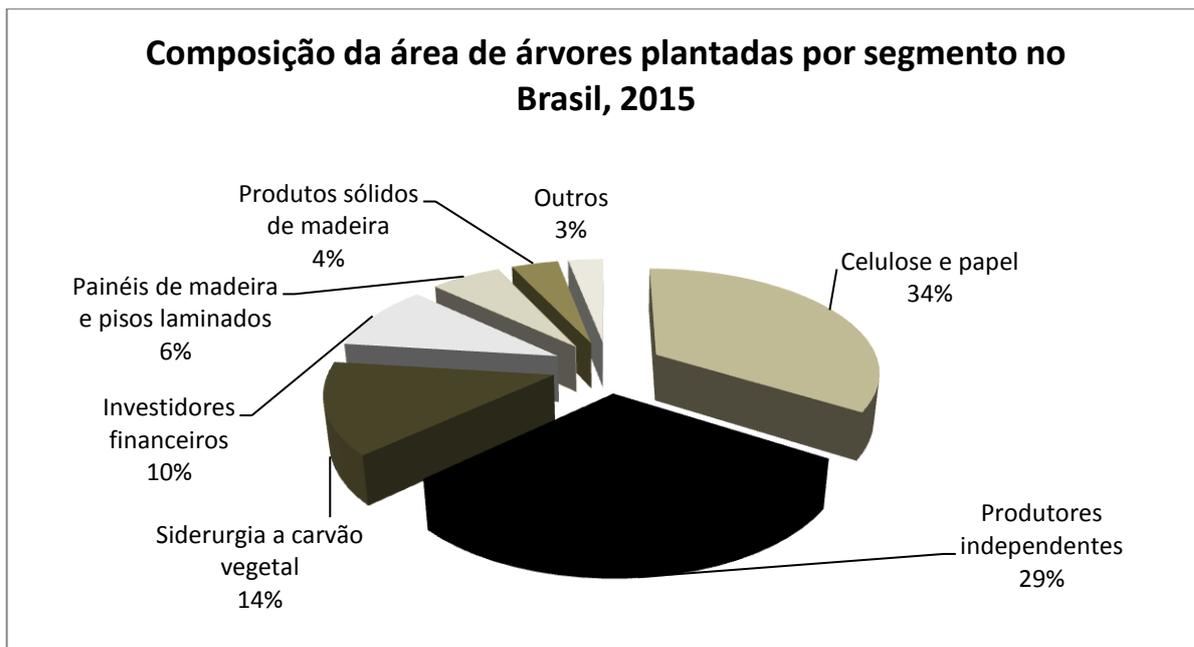


Figura 06 – Composição da área de árvores plantadas por segmento no Brasil, 2015.

Fonte: Adaptado da IBÁ (2016).

### 2.2.3 Tecnologia de produção de madeira adotada pela indústria siderúrgica integrada no Brasil

Entende-se por empresas siderúrgicas integradas aquelas que realizam todo o processo necessário à fabricação do seu produto final. Ou seja, iniciando-se pela produção do ferro gusa até o aço. Uma das características destas empresas é o suprimento de carvão ter origem em quase sua totalidade na carbonização de madeira produzida em cultivos de eucalipto próprios (AMS, 2015).

Considerando o consumo médio anual de carvão vegetal por essas empresas (AMS, 2015), a produtividade de  $30\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  (SOUZA *et al*, 2012) e produção regulada, conversão de  $1,3\text{m}^3$  de madeira para produção 1,0MdC (APERAM, 2015), pode-se inferir que a área

cultivada pela indústria siderúrgica no estado de Minas Gerais na época deste estudo se encontrou na ordem de 305.000ha, ou seja, em torno de 20% da área cultivada no estado de Minas Gerais (IBÁ, 2016).

Conforme estudos publicados, pode-se inferir que essas empresas aplicam tecnologias semelhantes para a produção de madeira de eucalipto para carbonização (PROTÁSIO *et al*, 2013-a, 2013-b; ASSIS *et al*, 2012; PEREIRA *et al*, 2012; SANTOS *et al*; 2011; NEVES *et al*, 2011; BROTEL, *et al*, 2010; MACHADO & LOPES; 2000, MOREIRA *et al*, 2004; MINETTE *et al*. 2004 e 2008; SIMÕES & FENNER, 2010; SOUZA *et al*, 2012). Elas podem nortear, portanto, as tecnologias a serem adotadas pelos pequenos e médios produtores rurais, à medida de sua escala de produção, para aumentar suas produtividades (SOUZA *et al*, 2012).

A existência de uma alta correlação entre densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão torna-se importante quando na escolha de espécies de madeira para a produção de carvão, permitindo-se antever o comportamento do mesmo mediante a avaliação da densidade de sua madeira. A existência de correlação entre densidade da madeira e densidade do carvão pode, portanto, nortear fundamentalmente a escolha de espécies destinadas à sua produção bem como as pesquisas sobre melhoramento de características do carvão, partindo-se particularmente da densidade básica da madeira. No caso, a escolha de espécies de eucalipto cujas densidades sejam elevadas é altamente vantajosa para os principais usos do carvão vegetal produzido a partir dessas espécies (BRITO & BARRICHELO, 1980).

Atualmente, predominam-se nos cultivos de eucalipto por essas empresas material clonal de eucalipto (PROTÁSIO *et al*, 2013-a, 2013-b; ASSIS *et al*, 2012; PEREIRA *et al*, 2012; SOUZA *et al*, 2012; SANTOS *et al*; 2011; NEVES *et al*, 2011; BROTEL *et al*, 2010). A produtividade média de madeira está na ordem de  $30\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ , coerente com os valores apresentados no zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais (GUIMARÃES *et al*, 2007), ilustrado na Figura 07.



Figura 07 – Plantio clonal de híbrido de *Eucalyptus spp*, com 2 e 5 anos de idade. Região de Curvelo – Minas Gerais, julho de 2012 (Foto do autor).

As atividades operacionais que antecedem a carbonização de madeira são cinco: a colheita, desgalhamento, arraste dos fustes da área de cultivo, desdobramento e transporte para a unidade de produção de carvão. Em todas elas se busca forma constantemente uma maior eficiência operacional por meio da mecanização (MACHADO & LOPES, 2000; MOREIRA *et al*, 2004; MINETTE *et al*, 2004 e 2008; e SIMÕES & FENNER, 2010). Estas atividades foram ilustradas nas Figuras 08 a 12.



Figura 08 – Colheita com *Feller Buncher*. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Foto do autor).



Figura 09 – Madeira em processo de secagem.  
Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Foto do autor).



Figura 10 – *Skidder* para arraste dos fustes da área de colheita.  
Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Foto do autor).



Figura 11 – Garra traçadora para desdobramento dos fustes.  
Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Foto do autor).



Figura 12 – Detalhes do desdobramento dos fustes por garra traçadora. Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Foto do autor).

Conforme observado em visitas técnicas para fins deste estudo, o arranjo predominante adotado foi de 3m x 3m, rotação de 14 anos e ciclo de corte de 7 anos. Observou-se também uma tendência de utilizar o arranjo 3m x 6m, espaçamento este com impactos positivos no custo da produção de madeira em todas as suas fases.

#### **2.2.3.1 Inferências quanto à geração de energia elétrica a partir de cavacos de madeira de eucalipto cultivado para a produção de carvão.**

A qualidade do carvão vegetal é determinada por suas propriedades físicas e químicas, tais como densidade, poder calorífico, resistência mecânica, umidade e composição química (carbono fixo, cinzas e materiais voláteis). O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de holocelulose (CENBIO, 2008; OLIVEIRA et al, 2010; SANTOS *et al*, 2011).

O rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende de sua constituição química, onde os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam com a espécie e é de grande importância para a escolha adequada da madeira a ser utilizada (QUIRINO *et al*, 2005).

Pode-se inferir, portanto, que a madeira cultivada para a produção de carvão pode ser utilizada com eficiência na geração de calor em uma termelétrica movida a cavacos de madeira. Também, que a tecnologia utilizada pela indústria siderúrgica em toda cadeia

produtiva de madeira para carbonização se aplica à produção de madeira para fins de geração de energia elétrica.

#### 2.2.4 Tecnologia de produção de carvão vegetal adotada pela indústria siderúrgica integrada no Brasil

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGCC, 2015), a indústria siderúrgica brasileira a carvão vegetal é a única no mundo a conservar um uso significativo deste redutor. Com base no período 2009 a 2014, Minas Gerais é o estado que mais consumiu carvão vegetal no Brasil, na ordem de 71% (Tabela 03). Neste estado e no ano de 2014, 93% deste insumo siderúrgico teve sua origem em madeira cultivada de eucalipto e 85%, com origem no próprio estado (AMS, 2015).

Tabela 03 – Consumo de carvão vegetal no Brasil, 2009 a 2014 (1.000Mdc).

ESTADOS	2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	Consumo	(%)										
<b>MG</b>	13.495	66,8	18.138	71,3	18.046	65,9	17.750	66,2	17.892	70,5	21233	82,6
<b>SP</b>	112	0,6	120	0,5	121	0,4	237	0,9	213	0,8	203	1,0
<b>RJ</b>	319	1,6	253	1,0	226	0,8	321	1,2	285	1,1	258	1,0
<b>ES</b>	180	0,9	596	2,3	1.071	3,9	1.020	3,8	985	3,9	991	3,8
<b>BA</b>	435	2,2	481	1,9	461	1,7	447	1,7	395	1,6	389	1,5
<b>MS</b>	710	3,5	936	3,7	1.350	4,9	1.950	7,3	1.820	7,2	602	2,3
<b>MA/PA</b>	4.953	24,5	4.911	19,3	6.092	22,3	4.320	16,1	3.780	14,9	602	2,3
<b>OUTROS</b>	-	-	-	-	-	-	785	2,9	-	-	2.004	7,8
<b>TOTAL</b>	<b>20.204</b>	<b>100,0</b>	<b>25.435</b>	<b>100,0</b>	<b>27.367</b>	<b>100,0</b>	<b>26.830</b>	<b>100,0</b>	<b>25.370</b>	<b>100,0</b>	<b>25.680</b>	<b>100,0</b>

Fonte: Adaptado AMS (2015).

O consumo de carvão vegetal no estado de Minas Gerais, após um aumento de demanda nos anos de 2004 e 2005 e forte retração decorrente da crise global de 2008, encontra-se na ordem de 20 milhões de metros (em torno de 5 milhões de toneladas), patamar dos primeiros anos da década anterior conforme o último Anuário Estatístico publicado pela Associação Mineira de Silvicultura (AMS, 2015), Tabela 04.

Tabela 04 – Evolução do consumo de carvão vegetal pelos diferentes segmentos industriais em Minas Gerais, em mil metros de carvão (1000MdC).

<b>Ano</b>	<b>Integradas</b>	<b>Ferro-Gusa</b>	<b>Ferroligas</b>	<b>Outros</b>	<b>Total</b>
<b>2002</b>	3.282	11.026	2.113	200	16.621
<b>2003</b>	3.383	13.500	2.254	332	19.469
<b>2004</b>	3.984	17.910	2.323	304	24.521
<b>2005</b>	4.628	17.654	2.514	363	25.159
<b>2006</b>	4.579	13.766	2.351	321	21.017
<b>2007</b>	5.527	13.708	2.405	268	21.909
<b>2008</b>	5.711	12.891	2.333	235	21.170
<b>2009</b>	5.049	6.772	1.874	68	13.763
<b>2010</b>	5.979	9.396	2.688	76	18.139
<b>2011</b>	6.318	8.995	2.648	86	18.047
<b>2012</b>	7.089	9.956	3.029	351	20.426
<b>2013</b>	7.053	9.899	3.008	366	20.327
<b>2014</b>	7.123	8.733	4.357	1.020	21.233

Fonte: Adaptado AMS (2015).

A indústria siderúrgica integrada a carvão vegetal responde por 33,5% do consumo total deste redutor no estado Minas Gerais (AMS, 2015). A Aperam Bioenergia e a Plantar são citadas pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos no documento Análise comparativa das diferentes tecnologias de carbonização e recuperação de subprodutos, relacionados à utilização de fornos retangulares e outros equipamentos para produção de carvão (CGEE, 2015). Estas empresas utilizam fornos retangulares que permitem a total mecanização das atividades. Na Figura 13, pode ser observado um equipamento utilizado para a descarga de madeira na unidade de produção de carvão e carregamento do forno. A descarga de carvão e o seu carregamento para transporte são realizados por equipamentos do mesmo porte.



Figura 13 – Forno retangular e equipamento utilizado para a carga do forno.  
Região do Alto Jequitinhonha – Minas Gerais (Fotos do autor).

Há ações, ainda isoladas, de queima dos gases gerados na carbonização com foco principal na proteção do meio ambiente. Já os produtores independentes, que respondem por importante parte da produção, conservam o processo tradicional de produção, ou seja, artesanal, utilizando-se pequenas unidades de produção, e fornos com pouca tecnologia agregada (CGCC, 2014, 2015).

Em uma importante evolução do processo de carbonização de madeira, a Aperam Bioenergia desenvolveu um sistema de total automação. Este sistema foi instalado na Unidade de Produção de Energia Lagoa, localizada no município de Minas Novas – Minas Gerais (APERAM, 2016).

#### **2.2.4.1 Inferências quanto à geração de energia elétrica a partir de gases de carbonização e cavacos de madeira de eucalipto**

A partir de dados apresentados pela Associação Mineira de Silvicultura (AMS) infere-se que são lançados na atmosfera no estado de Minas Gerais na ordem de 6 milhões de toneladas de gases de carbonização por ano. Estes gases, se queimados, gerariam em energia térmica o

equivalente a queima na ordem de 4,3 milhões de toneladas de carvão (CETEC, 1980; BENIVIDES *et al*, 2009; AMS, 2015).

O porte das unidades de produção de carvão adotado pela indústria siderúrgica integrada a carvão vegetal, o tipo de forno utilizado e o processo já dominado de condução e queima dos gases gerados na carbonização são estratégicos para a geração de energia elétrica a partir da queima deste combustível.

Essa visão vai ao encontro do Plano Setorial de Reduções de Emissões da Siderurgia a Carvão Vegetal, lançado pelo governo federal em 2010, que objetivou não apenas a promover o cumprimento da meta de redução de emissões assumida voluntariamente no âmbito do Acordo de Copenhague, mas principalmente a modernização da produção do carvão vegetal, necessária para consolidar a sustentabilidade da produção do ferro-gusa a carvão vegetal (CGCC, 2015).

### **2.2.5 A geração de energia em termelétricas movidas a biomassa no Brasil**

Conforme descrito no Atlas de Energia Elétrica no Brasil (BRASIL, 2008):

- Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. É classificada de acordo com a sua origem, podendo ser florestal, agrícola e rejeitos urbanos e industriais. O tipo de biomassa define a tecnologia a ser adotada no processo de produção de vapor, e, conseqüentemente, da energia a ser utilizada. Os processos para a obtenção de energia se caracterizam pela necessidade de grande volume de matéria-prima para produção de pequenas quantidades. A exceção a essa regra é a utilização da biomassa florestal em processos de cogeração industrial;
- A biomassa pode ser considerada como uma forma indireta de energia solar. A partir da fotossíntese, há liberação de oxigênio e a captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal agente do efeito estufa. Espécies florestais podem ser cultivadas exclusivamente com a finalidade de energia nas suas diferentes formas. O manejo adequado permite a retirada planejada de árvores em idade de colheita para este fim, com a respectiva reposição de mudas ou condução da talhadia, com conseqüente aumento da capacidade do sequestro de CO<sub>2</sub>.

Projetos florestais de implantação e manejo podem ser caracterizados e formatados, inclusive, como Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL);

- Decorrente do processo de extração da celulose, há produção de lixívia negra, também chamada de licor negro. Depois do bagaço de cana, é a atual maior responsável pela geração de energia elétrica no Brasil a partir da biomassa (Figura 14);

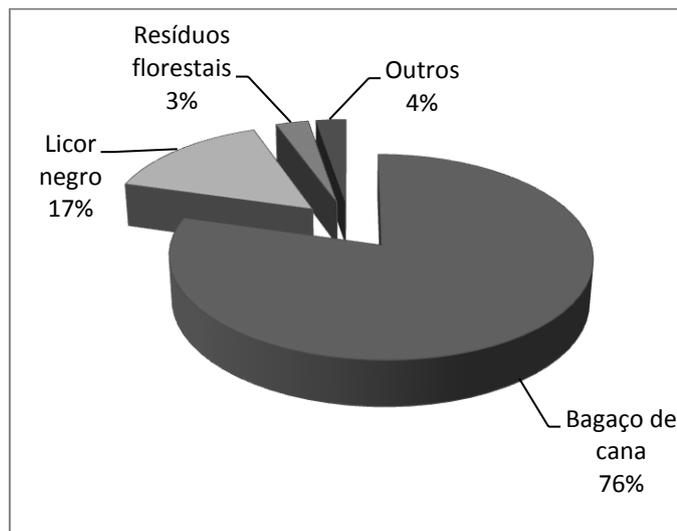


Figura 14 – Participação de diferentes biomassas na geração termelétrica brasileira.

Fonte: BIG - Banco de Informações de Geração, Matriz de Energia Elétrica (ANEEL- d, 2016).

- Na utilização sustentável do bagaço da cana para a produção de eletricidade por meio de usinas termelétricas, o balanço de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é praticamente nulo, pois as emissões resultantes da atividade são absorvidas e fixadas pela planta durante o seu crescimento;
- São várias as rotas tecnológicas adotadas para a geração de energia elétrica tendo como combustível a biomassa. O princípio básico é a queima da biomassa em uma caldeira que gera vapor em altas temperaturas e pressão, este é transferido para uma turbina que por sua vez, gira o gerador. De maneira geral, todas as rotas são utilizadas em processos de cogeração. Significa que a partir da mesma fonte de energia térmica, o vapor gerado é direcionado para dois ou mais fins, hoje tradicionalmente utilizado em processos industriais, em

que, a exemplo da indústria sucroalcooleira, é gerado energia elétrica e vapor de processo;

- O Brasil domina as tecnologias envolvidas nesse processo geração de energia elétrica e possui fabricantes de todos os equipamentos necessários. Estas tecnologias são amplamente utilizadas pela indústria sucro-alcooleira na cogeração de energia elétrica;
- As principais rotas tecnológicas utilizadas no Brasil, conforme o Plano Nacional de Energia 2030 e reproduzido no Atlas de Energia Elétrica do Brasil (BRASIL, 2008), são:

✓ **Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão**

Neste processo, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a partir da energia térmica resultante é produzido vapor, utilizado seja para acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico inerente ao processo industrial, seja para acionar turbinas acopladas em geradores de energia elétrica. Também, o vapor que seria liberado na atmosfera após a realização desses processos pode ser encaminhado para o atendimento das necessidades térmicas do processo de produção (BRASIL, 2008).

✓ **Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração:**

A existência de um condensador na exaustão da turbina e de níveis determinados para aquecimento da água que alimentará a caldeira caracterizam a diferença fundamental deste processo em relação à rota de contrapressão. Estas características proporcionam maior flexibilidade da geração termelétrica e proporcionam aumento na eficiência global da geração de energia. Uma desvantagem deste processo é a exigência de investimentos muito superiores aos necessários para implantação do sistema simples de condensação.

✓ **Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa**

Neste processo, o combustível líquido ou sólido é gaseificado por meio da oxidação parcial em temperatura elevada, produzindo um gás combustível com potencial de ser utilizado em usinas térmicas movidas a gás para a

produção de energia elétrica. O potencial de se utilizar o gás diretamente em uma turbina e, posteriormente, a energia gerada pela sua combustão para a produção de vapor que também movimentará uma outra turbina caracteriza um ciclo combinado que aumenta o rendimento do processo. Entretanto, ainda não é uma tecnologia competitiva do ponto de vista comercial. A maior dificuldade para a sua aplicação é a obtenção de um equipamento capaz de produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação.

### **2.2.6 Estudos pioneiros de geração de energia elétrica com biomassa com origem em cultivos florestais no Brasil**

Estudos no Brasil que tratam da geração de energia elétrica a partir da biomassa florestal ainda são escassos. Tratam de simulações ou projetos em pequena escala, o que pode ser explicado pela ainda muito baixa participação da madeira na matriz energética brasileira, 0,30%, praticamente de resíduos, conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016).

Müller (2005) avaliou o potencial e a viabilidade da produção de madeira para geração de energia elétrica em diferentes sistemas de produção com o uso de um clone de *Eucalyptus* spp, considerando três escalas de produção de energia, 1 MW, 5 MW e 10 MW de potência instalada. Incluiu no seu estudo o montante possível de ser obtido com a venda de certificados de emissões reduzidas no escopo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido pelo Protocolo de Kyoto.

Gonçalves *et al* (2006) estudaram a opção de comutação de um projeto de fabricação de etanol, no qual o etanol ou o açúcar poderiam ser então produzidos. Para tanto, utilizaram ferramentas encontradas no modelo quadrinomial. O resultado desta flexibilidade operacional aumentou o valor do projeto não flexível, de acordo com a teoria das opções reais.

Gomes (2007) dedicou seus estudos a construir uma modelagem das relações entre os fatores básicos de produção florestal e os fatores básicos de um sistema de geração de potência elétrica, tomando este último como fixo. Trabalhou com uma usina em funcionamento com capacidade instalada de 9 MW.

Seratto (2010) estudou a viabilidade econômica de um projeto de produção de energia elétrica via biomassa florestal, tendo como caso a Usina Santa Terezinha de Paranacity, localizada no município de Paranacity (PR). O projeto previa a produção de madeira para atender esta usina na entressafra de cana-de-açúcar, em uma área de 5.059,8 hectares.

Quéno (2010) comparou o custo de produção de biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia, objetivando estabelecer o custo de produção da unidade energética gerada pela biomassa do eucalipto, em diferentes tratamentos silviculturais, e pela biomassa do capim-elefante, aplicando uma análise de sensibilidade para verificar as influências de fatores como o tratamento silvicultural do eucalipto, a produção volumétrica de cada espécie, o custo da terra e a taxa de juros nos custos de produção analisados.

Paulino (2012) analisando povoamentos clonais de eucalipto e fazendo analogia à florestas energéticas, estudou a rotação técnica e a rotação econômica em diversos espaçamentos, considerando a venda de madeira em pé.

## **2.3 TEORIA DAS OPÇÕES REAIS, ANÁLISE DE RISCO DE INVESTIMENTO E ESTUDOS RELACIONADOS COM OPÇÕES REAIS**

### **2.3.1 Teoria das Opções Reais**

A Teoria das Opções Reais surgiu como uma analogia ao conceito das opções financeiras (SOUZA NETO *et al*, 2008) e é considerada por Copeland & Antikarov (2001) uma das ideias mais importantes em finanças corporativas surgidas nas últimas décadas. O termo “opções reais”, segundo Amaran & Kulatilaka (1999), pode ser atribuído ao professor Stewart Myers (1977), primeiro estudioso que observou que muitos dos ativos reais poderiam ser analisados sob a perspectiva das Opções Financeiras (BRASIL, 2007; SOUZA NETO, 2008).

#### **2.3.1.1 Opções Financeiras**

As Opções Financeiras são instrumentos derivativos. São direitos que se adquire ou se vende pagando ou recebendo determinado valor para isto. Existem dois tipos de opções, de compra (*calls*) e de venda (*puts*). As opções representam um pequeno percentual do ativo de referência, que dá o direito ou obrigação de compra ou de venda de um ativo. Podem ser do tipo americana ou tipo europeia. A primeira pode ser exercida a qualquer momento pelo seu comprador, e a segunda, somente no seu vencimento (PAZ, 2012).

No sentido mais genérico, uma opção pode ser vista como um instrumento que confere ao titular a oportunidade de comprar ou vender um ativo específico, a um determinado preço, em uma data de vencimento estipulada ou antes dela. As opções talvez sejam o tipo mais popular de derivativo (GITMAN, 2010).

Exercer uma opção significa o comprador fazer valer seu direito (não obrigação) de comprar (nas opções de compra) ou vender (nas opções de venda) o ativo subjacente ao preço estabelecido no contrato (preço de exercício). Isto faz o vendedor (ou lançador) ter de cumprir sua obrigação (PAZ, 2012).

O preço de opção é composto de dois fatores principais que mensuram o que realmente a opção vale, tendo em vista o ativo de referência e o quanto a incerteza das variáveis do mercado agrega valor a ela. O valor intrínseco é a diferença entre o preço do ativo principal e da opção. As mais variadas incertezas sobre o futuro dos preços no mercado faz com que as opções tenham o chamado valor extrínseco, que é o valor pago proporcional ao tempo para o vencimento da opção, acrescido das variáveis como volatilidade, taxa de juros, inflação do período, entre outros (PAZ, 2012).

Para as precificações de opções são bastante adotadas e úteis o Modelo Binomial e o Modelo de Black-Scholes. Uma árvore binomial é um diagrama que descreve os diferentes preços da ação durante o prazo que resta da opção. O preço de uma opção pela árvore binomial é calculado de forma regressiva, partindo da data de vencimento. De acordo com o Modelo de Black-Scholes, quanto mais se subdividir o prazo da opção, mais variações possíveis nos preços da ação podem ser calculados, formando uma distribuição conhecida por lognormal. A partir desse processo de subdivisão contínua em prazos cada vez menores, é que Black e Scholes desenvolveram a fórmula de cálculo de uma opção de compra. (ASSAF NETO, 2010)

### 2.3.1.2 Opções Reais

O valor de um projeto é usualmente apurado pelo cálculo do valor presente de fluxos de caixa projetados por um horizonte de tempo estabelecido, utilizando para isto, a seguinte equação (BRASIL, 2007; RESENDE & OLIVEIRA, 2013):

$$VPL = \frac{FC_1}{(1+r)} + \frac{FC_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+r)^n} + VR \quad (01)$$

Ou, de forma resumida,

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)} + VR \quad (02)$$

Onde:

$VPL$  = valor Presente Líquido do projeto ou negócio

$r$  = taxa de desconto apropriada

$FC_n$  = Fluxos de caixa Projetados no tempo  $n$

$FC_t$  = Fluxos de caixa Projetados no tempo  $t$

$VR$  = Valor Residual a valor presente

Nessa forma de avaliação, os riscos têm importância e são incorporados às taxas de descontos (ANTONIK & ASSUNÇÃO, 2015). Quanto maiores os riscos considerados, maiores estas taxas.

A avaliação por meio dos fluxos de caixa descontados é do tipo “agora ou nunca” (LIMA & SUSLICK, 2001), ou seja, ou executam os projetos, ou não. Não são consideradas possíveis flexibilizações gerenciais.

Flexibilidades Gerenciais são importantes ferramentas utilizadas pelas empresas para lidar com a incerteza futura, possibilitando a adaptação em diferentes cenários onde têm oportunidade de maximizar os seus lucros e minimizar as suas perdas. Possuem valor, entretanto, não capturado pelos métodos tradicionais de análise de projetos como o Fluxo de Caixa Descontado (COPELAND & ANTIKAROV, 2001; BRASIL, 2007; SOUZA NETO; BASTIAN-PINTO, 2009; JOAQUIM *et al*, 2015).

Esses valores podem ser estimados com a abordagem da Teoria das Opções Reais. Esta nova metodologia de análise, que vem sendo desenvolvida nas últimas décadas, utiliza um processo análogo ao usado no apreçamento de opções financeiras para se avaliar projetos e decisões de investimento em ativos reais (BRASIL, 2007).

Conforme Copeland & Antikarov (2001) e Brandão (2009) “Opções Reais *é o estado da arte para a avaliação e gerenciamento de projetos estratégicos com incertezas e flexibilidades*” e “*é o direito, mas não a obrigação de empreender uma ação, a um custo predeterminado, por um período preestabelecido*”. Segundo Graham & Harvey (2001), dos 392 Diretores Financeiros dos EUA e Canadá pesquisados, 26,6% usavam opções reais “sempre ou quase sempre” para análise de ativos reais.

As analogias entre as Opções Financeiras e Opções Reais são apresentadas na Tabela 05:

Tabela 05 – Analogias entre as Opções Financeiras e Opções Reais.

Opções Financeiras		Opções Reais
Opção de Compra (call)	➔	Opção de Investir/Expandir
Opção de Venda (Put)	➔	Opção de Abandono
Valor da Ação	➔	VPL do Projeto
Preço de Exercício	➔	VPL do Investimento
Volatilidade da Ação	➔	Volatilidade do Projeto
Dividendos	➔	Fluxo de Caixa do Projeto

Fonte: Adaptado pelo autor de material cedido pelo IBMEC\_RJ.

Os estudos das Opções Reais iniciaram-se a partir do trabalho de Black, Scholes e Merton (1973). Em 1979, foi apresentado o Modelo Binomial de Cox, Ross e Rubinstein (1979).

De acordo com Souza Neto *et al* (2008), foram publicados três livros sobre o assunto na década de 90, sintetizando a maior parte dos pontos principais, progressos e aplicações das técnicas e conceitos de opções reais que haviam sido desenvolvidos e apresentados em um grande número de artigos pioneiros, técnicos e científicos, complementares no que diz respeito às suas abordagens: *Investment under Uncertainty*, dos autores Dixit e Pindyck, publicado em 1994, *Real Options*, de autoria de Trigeorgis, publicado em 1996 e *Real Options – Managing Strategic Investments in an Uncertain World*, dos autores Amran and Kulatilaka.

A partir de 1980, o advento das planilhas eletrônicas para uso em PC facilitou a criação de programas computacionais. Em 1990, já havia programas eficazes para a Análise Monte Carlo e Árvore de Decisão. Em 2001, Copeland & Antikarov propuseram o processo em quatro passos para a avaliação de opções reais. Este processo assumiu algumas simplificações matemáticas, sem comprometer os resultados da avaliação e ajudaram significativamente na sua assimilação (SOUZA NETO *et al*, 2008).

Na Tabela 06 podem ser observadas características de Ativos Financeiros e Ativos Reais.

Tabela 06 – Características de Ativos Financeiros e Ativos Reais.

Ativos Financeiros	Ativos Reais	Comentários
Divisibilidade	Indivisibilidade	Projetos não são divisíveis.
Alta Liquidez	Baixa Liquidez	Implica em maior risco
Baixo custo de transação	Alto custo de transação	Infringe o CAPM
Informação disseminada	Assimetria de informação	Permite ganhos de arbitragem
Mercados	Sem mercado	Sem valor de mercado
Riscos de Mercado	Riscos de Mercado e Risco Privado	Riscos privado não relacionados com mercados
Curto Prazo	Longo Prazo	Tempo de expiração
Gerência Passiva	Gerência Ativa	Valor da Flexibilidade

Fonte: Adaptado pelo autor de material cedido pelo IBMEC\_RJ.

Como as Opções Financeiras, as Opções Reais dependem de seis variáveis básicas (SOUZA NETO *et al*, 2008):

- ✓ Ativo subjacente sujeito aos Riscos (ASSR): no caso das Opções Financeiras, é um valor mobiliário, como, por exemplo, uma ação ordinária ou um título. No caso das Opções Reais, é o valor do ativo real sem considerar as flexibilidades gerenciais.
- ✓ Preço do exercício: valor da ação no momento de sua maturidade, no caso das Opções Financeiras. Montante necessário que deve ser investido para realizar a opção.
- ✓ Prazo de vencimento da opção: período no qual a opção está disponível.
- ✓ Desvio padrão do valor da ASSR: é a medida da volatilidade da ASSR, o que significa os riscos e as incertezas relativos ao retorno futuro esperado do investimento.
- ✓ Taxa de juros livre de risco: taxa esperada livre de riscos.
- ✓ Dividendos: no caso de Opções Reais, são os fluxos de caixa descontados futuros produzidos pelo projeto.

Conforme Trigeorgis (1993) e Copeland & Antikarov (2001), as opções se classificam, primeiramente, pelo tipo de flexibilidade que oferecem: diferir, expandir e abandonar. Algumas podem ser compostas, são opções sobre opções. Há também as que se definem pelo tipo de incerteza que influencia a opção, as chamadas “arco-íris” ou múltipla interação. A Tabela 07 apresenta um resumo dos principais tipos de opção e seu uso:

Tabela 07 – Taxonomia das Opções Reais.

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Utilização</b>
Opção de Diferir	Pode-se esperar antes de tomar a decisão.	Indústria de extração de recursos naturais, mercado imobiliário, agrobusiness, produtos.
Opção de Alterar Escala Operacional	Pode-se expandir, contrair, abandonar e recomeçar as operações.	Indústria de recursos naturais, construção de novas facilidades e cíclicas, mercado imobiliário comercial, indústria de bens e consumo, indústria da moda.
Opção de Conversão	Alterar <i>mix</i> de produtos, utilização de diferentes insumos.	Produtos de bens e consumo, brinquedos, eletrônicos, peças de máquinas. Custo de insumos e matérias primas.
Opção de abandono	Abandonar o projeto ou a operação permanentemente e vendê-la.	Mercado financeiro, indústria de capital intensivo, novos produtos em mercado incerto.
Opção Composta	Os investimentos são realizados em etapas, permitindo a opção de abandonar ou de seguir para a nova fase.	Investimento em pesquisa e desenvolvimento, projetos de longo prazo de capital intensivo.
Opção de crescimento (múltipla interação)	Cadeia de projetos inter-relacionados para futuras oportunidades de crescimento e desenvolvimento.	Empresas de alta tecnologia, indústria baseada em inovação e investimento em R&D, operações multinacionais, aquisições estratégicas, empresas de múltiplos produtos, informática, computacional
Opção Arco-íris	Projetos reais frequentemente envolvem a coleção e combinação de várias opções.	Projetos reais em todos os tipos de indústria e negócios relacionados anteriormente.

Fonte: Adaptado de Copeland & Antikarov (2001) e Souza Neto (2008).

Conforme Dixit & Pindyck (1994), para uma opção ter valor são necessárias três condições com relação ao valor do ativo subjacente: incerteza do seu valor no futuro, irreversibilidade pelo menos parcial em relação ao investimento, uma vez este realizado, e flexibilidade quanto

à capacidade da gestão em agir, possibilitando alterar o caminho futuro do valor do projeto em resposta às incertezas.

Estas condições estão presentes na maioria dos projetos. São as principais fontes de riscos, podendo advir de fatores de natureza econômica, tecnológica e ambiental (BASTIAN-PINTO, 2009).

Na Figura 15 é demonstrado como a flexibilidade e a incerteza afetam o valor de uma opção.

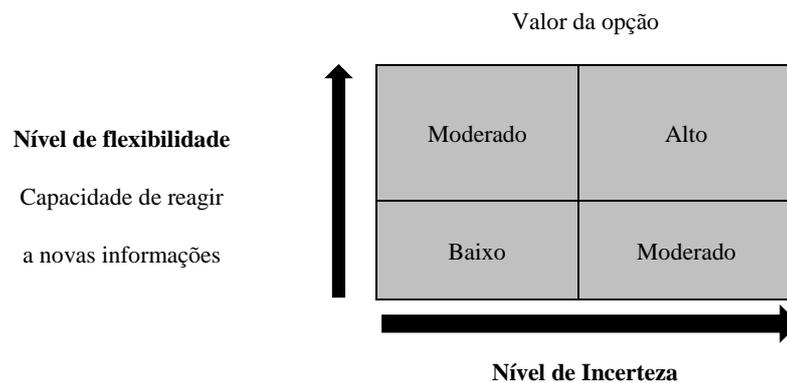


Figura 15 – Demonstração de como a flexibilidade e a incerteza afetam o valor de uma opção.  
Fonte: Adaptado de Copeland & Antikarov (2001).

### 2.3.1.3 Processos estocásticos e a escolha para aplicações em Opções Reais

Nesta seção foram abordados aspectos gerais dos processos estocásticos e a escolha para aplicações em Opções Reais (BRANDÃO, 2001; BASTIAN-PINTO & BRANDÃO, 2007; BASTIAN-PINTO, 2009).

- Um Processo Estocástico é fenômeno que varia de forma imprevisível com a passagem do tempo. Sua análise consiste em prever um comportamento estocástico por meio de distribuições conjuntas determinadas, tendo como base dados de comportamento passado conhecidos. Estados do Processo são valores que a variável analisada pode assumir nos tempos estabelecidos ( $x_t$ ).
- As incertezas em um projeto podem ter mais do que apenas dois estados. Na prática, o número de incertezas pode ser infinito. Em um processo estocástico, uma variável envolve no tempo de uma maneira que é pelo menos parcialmente aleatória .

- Ainda segundo esses autores, no **processo estocástico de Markov** somente o valor atual da variável é relevante para prever a evolução futura do processo, ou seja, valores históricos ou mesmo o caminho através do qual a variável atingiu o seu valor atual são irrelevantes para a determinação do seu valor futuro. Assume-se que preços de ativos em geral seguem um processo de Markov.
- Random Walk, ou Caminho Aleatório, é um dos processos estocásticos mais básicos, tendo o seu nome derivado do caminho seguido por um marinheiro bêbado andando ao longo do cais. Os seus passos trôpegos variam aleatoriamente de direção, o que faz o destino final se tornar mais incerto com o passar do tempo. Este processo é um processo de Markov em tempo discreto que tem incrementos independentes. Pode incluir um termo de crescimento (drift) que representa um crescimento de longo prazo. Sem o termo de drift, a melhor estimativa do próximo valor da variável nos seus primeiros estados é o seu valor atual, uma vez que o termo de erro é normalmente distribuído com média zero. Com o termo de drift, os valores futuros da variável tendem a crescer de maneira proporcional a taxa de crescimento.
- Conforme ainda estes autores, o movimento Aritmético Browniano (MAB) é um processo de Wiener (processo estacionário) adicionado com um termo de drift. A evolução de um MAB combina duas parcelas, um crescimento linear, com taxa  $\mu$ , e um crescimento aleatório com distribuição normal e com desvio padrão  $\sigma$ . O foco deste processo é na mudança no valor da variável, ao invés do valor da variável em si. Tem uma distribuição normal por ser um Random Walk. Também conhecido como um modelo aditivo por razão da variável aumentar um valor constante em cada período de tempo.
- O MAB apresenta como limitação para análise de ativos o fato da variável poder eventualmente assumir valores negativos por ser uma variável normalmente distribuída. Para uma ação que não paga dividendos, a taxa de retorno desta ação se reduz com o tempo à medida que o valor da ação aumenta. No entanto, os investidores exigem uma taxa de retorno constante, independente do preço da ação. No MAB, o desvio padrão é constante ao longo do tempo, ao passo que para melhor modelar ativos, o desvio padrão deveria ser proporcional ao valor do ativo. Esses motivos fazem com que o MAB não seja o processo mais indicado para modelar preços de ações ou ativos em geral.

- O Movimento Geométrico Browniano (MGB) ou modelo Multiplicativo é considerado um processo mais apropriado para modelar ativos devido às suas características de permitir crescimento exponencial, como no caso de juros compostos, os seus retornos são normalmente distribuídos, o que facilita a sua manipulação matemática, e o valor da variável não pode se tornar negativo. O retorno e a volatilidade *proporcionais* do processo são constantes.
- No Movimento Geométrico Browniano, a variável tende a alcançar valores bastante diferentes em relação ao seu valor inicial. Aplicável à maioria dos ativos, ativos como *commodities* não se comportam desta forma. Embora possam sofrer variações aleatórias no curto prazo, muitos ativos como petróleo, produtos siderúrgicos, produtos agrícolas, entre outros, têm o seu preço correlacionado com o seu custo marginal de produção.
- Dentro de princípios microeconômicos, à medida que os preços variam, produtores aumentarão a produção para se beneficiar dos preços altos, e reduzirão para evitar perdas quando os preços forem baixos. Isto força os preços a reverterem-se ao seu valor de equilíbrio de longo prazo. A utilização de modelos de Processos de Reversão à Média se mostra mais adequada nas análises de Opções Reais nestes casos.
- A escolha do processo estocástico mais realista para a determinação do valor de uma opção real pode ser apoiada em considerações microeconômicas de equilíbrio de preços, na análise de ocorrência de eventos raros ou eventuais. A combinação destes processos pode, porém, implicar em uma maior dificuldade para a estimação de parâmetros .
- Alguns modelos requerem a existência de séries de preços futuros que possibilitam a obtenção de uma representação do modelo na abordagem Espaço-Tempo e a estimação do conjunto de parâmetros realizada através do Filtro de Kalman combinado com estimadores de máxima verossimilhança. Entretanto, a escolha do modelo poderá ser influenciada pelas limitações de bases de dados disponíveis para a análise.
- A pesquisa por um processo mais adequado pode ser considerada uma ação de custo elevado em relação aos benefícios a serem obtidos, considerando que em grande parte dos modelos estocásticos, a aleatoriedade é representada por incrementos de Wiener.

- A duração de vida de um ativo, quando relativamente curto, permite a escolha mais fácil de um processo estocástico para a obtenção de parâmetros, tornando o aprofundamento na pesquisa do processo um fator de menor relevância. No caso de ativos de vida longa, a pesquisa pode ser condição para obter um processo mais fidedigno para obtenção dos valores de parâmetros.

Bastian-Pinto, Brandão & Hahn (2009) demonstraram que na avaliação de uma opção de troca de produto em usinas processadoras de açúcar e etanol no Brasil, a diferença no seu valor pode variar de 20% a 70% sobre o caso base, quando as incertezas são modeladas por *MRM* ou *MGB*, respectivamente. Esta diferença também foi observada por Kerr *et al* (2009) quando estimaram o tempo ótimo de corte de um investimento em reflorestamento.

### **2.3.2 Análise de riscos em projetos de investimento**

A análise de viabilidade de projetos de investimentos tem sido uma preocupação constante do empresariado. Nenhuma empresa ou organização pode assumir riscos que não tenha condições de “bancar” ou que porventura afetem o negócio. Conhecer os tipos de riscos e projetá-los no tempo é indispensável para evitar situações adversas no futuro (ANTONIK, 2004).

Em sua acepção mais simples, risco é a chance de perder dinheiro. O risco é usado de forma intercambiável com incerteza em referência à variabilidade dos retornos associados a um determinado ativo. As fontes de riscos são classificadas como específicos da empresa – operacional e financeiro –; como específicos do acionista – taxa de juros, risco de liquidez e mercado –; como específico da empresa e do acionista – de evento, de câmbio, de poder aquisitivo e tributário – (GITMAN, 2010).

De acordo com Assaf Neto (2010), risco sistemático é o que não pode ser eliminado e risco diversificável é o que pode ser total ou parcialmente diluído pela diversificação da carteira.

Existe o risco quando as variáveis encontram-se sujeitas a uma distribuição de probabilidade conhecida (ou que pode ser calculada com algum grau de precisão). Em outras palavras, representa uma incerteza que pode ser medida. Caracteriza a incerteza quando esta distribuição de probabilidade não pode ser avaliada (envolve situações de ocorrência não repetitiva), ou seja, consiste em um risco que não pode ser avaliado. Situações sob incerteza são caracterizadas pela presença de múltiplos resultados possíveis, com probabilidades associadas a diferentes resultados. Existem quando mais de um resultado associado à

alternativa e probabilidades não podem ser associadas aos resultados projetados (BRUNI, 2008).

Encontra-se a amplitude da medida do risco de um ativo subtraindo-se o pior resultado (pessimista) do melhor resultado (otimista) (GITMAN, 2010).

De acordo com Assaf Neto (2010), a teoria da utilidade exprime a satisfação do indivíduo atendida na decisão de investimento (ou de consumo). O investidor escolhe sempre aquela que oferece maior utilidade (satisfação) para ele. A Utilidade é como se fosse uma medida quantitativa de satisfação proporcionada por um investimento (ganho). O investidor é classificado em relação à preferência ao risco como indiferente, quando o retorno exigido não muda se o risco aumentar; como averso, quando o retorno exigido aumenta com o risco; e como propenso, quando o retorno exigido diminui com o aumento do risco.

A Função Utilidade pode auxiliar uma empresa na tomada de decisão frente a uma operação de risco. Esta ferramenta matemática atribui aos resultados de um problema uma unidade de medida decisória entre 0 e 1, que mensura seu nível de satisfação ou utilidade com valores no intervalo caracterizando assim o perfil do decisor (NEPOMUCENO FILHO & SUSLICK, 2000; LUDWIG & CARDOSO, 2003; MOTTA & CALÔBA, 2013), de acordo com a ilustração apresentada na Figura 16.

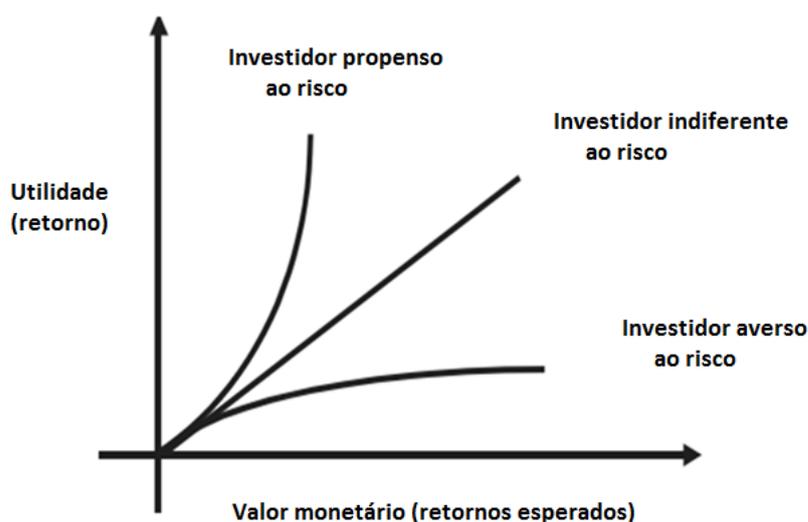


Figura 16 – Curva de propensão, indiferença e aversão ao risco.

Fonte: Adaptado de Nepomuceno Filho & Suslick (2000), Ludwig & Cardoso (2003) e Assaf Neto (2010).

Os principais métodos de decisão sob incerteza consistem no emprego e uso dos critérios maximin (ou minimax), maximax (minimin), Hurwicz, Laplace e Savage. O critério maximin (ou minimax) adota critérios de decisão baseados em uma visão pessimista do problema. Supõe que, escolhido um determinado modelo, ocorrerá o pior evento possível. O critério da decisão baseia-se no “menos pior”, ou seja, escolhe-se a alternativa que apresenta o máximo resultado dentre os mínimos possíveis. O critério maximax (minimin) de modo inverso ao maximin, adota critérios de decisão empregando uma visão otimista do problema. Supõe-se que, escolhido uma determinada alternativa, ocorrerá o maior resultado máximo (BRUNI, 2008).

O critério de Hurwicz admite que os tomadores de decisão, de modo geral, não são extremamente pessimistas ou otimistas, conforme apresentado pelos critérios de maximin ou maximax, fornecendo uma regra de decisão intermediária entre esses dois limites. Estabelece uma ponderação entre o otimismo e o pessimismo, através do emprego de constante para a ponderação (BRUNI, 2008).

Situações sob incertezas são caracterizadas pela ausência de probabilidades associadas aos diferentes resultados. O critério de Laplace assume resultados com probabilidades iguais de ocorrência, baseando-se na escolha da alternativa que fornece o maior valor médio. O critério de Savage busca estimar os arrependimentos máximos que poderão ocorrer para cada um dos eventos quando é feita uma escolha. Por arrependimento, entende-se o que se deixar de ganhar em cada estado ou escolha em função da melhor alternativa não ter sido a escolhida (BRUNI, 2008).

O conceito básico de probabilidade refere-se à possibilidade (ou chance), expressa normalmente em porcentagem, de ocorrer determinado evento. Na prática das decisões de investimentos, a distribuição de probabilidades não se resume geralmente a um único resultado (evento) esperado, mas a diversos valores possíveis de ocorrer. O raciocínio básico é distribuir os resultados esperados (elementos de incerteza da decisão) nos valores possíveis de se verificar, e identificar, em cada um deles, uma probabilidade de ocorrência. Nesse caso, há um conjunto de eventos incertos (variáveis aleatórias), representado pelos resultados possíveis de serem gerados, e estruturados sob a forma de uma distribuição de probabilidades (ASSAF NETO, 2010; GITMAN, 2010; ASSAF NETO & LIMA, 2010).

Uma probabilidade é definida como objetiva quando se adquire uma experiência passada sobre a qual há uma expectativa de que se repetirá no futuro. A probabilidade subjetiva

decorre de eventos novos, sobre os quais não se tem nenhuma experiência prévia relevante. Nessa situação típica de incerteza, a unidade decisória precisa atribuir, de forma subjetiva, probabilidade aos resultados esperados. Como exemplo, o impacto no fluxo de caixa esperado decorrente do lançamento de um produto novo. Considera-se neste caso pesquisa de mercados e projeções de demanda, intuição do administrador, experiência profissional, etc. (ASSAF NETO, 2010).

O desvio padrão e a variância são as mais importantes e utilizadas medidas de risco de um ativo. O coeficiente de variação é uma medida estatística que indica a dispersão relativa, isto é, o risco unitário de um ativo (GITMAN, 2010; ASSAF NETO & LIMA, 2010)

De acordo com Bruni (2008), o uso de árvores de decisão consiste em uma técnica facilitadora da análise de riscos de projetos de investimentos. Nas árvores, as decisões são apresentadas sequencialmente, da esquerda para a direita. Costuma-se representar os pontos de decisão, simbolizados por meio de pequenos quadrados, e os pontos de risco, simbolizados por meio de pequenos círculos. O primeiro passo é desenhar um diagrama com o formato de uma árvore que representa a estrutura do problema, os ramos representam os diversos fatos que podem ocorrer, e os nós onde aparecem as alternativas. É necessário decidir entre alternativas excludentes e calcular as probabilidades condicionais de sucesso ou fracasso (BRUNI, 2008).

A avaliação de projetos de investimento comumente envolve um conjunto de técnicas que buscam estabelecer parâmetros de sua viabilidade. Em condições de incerteza, uma alternativa para a obtenção do retorno esperado e do risco de um projeto pode ser expresso através da utilização do Método Monte Carlo (MMC). Este método envolve a utilização de números aleatórios nas simulações, o que pode facilitar acentuadamente os cálculos do risco, ainda mais quando suportados por uma planilha eletrônica dotada de linguagem de programação que permite a geração automática dos resultados (BRUNI *et al*, 1998; DUARTE JÚNIOR, 2016), utilizado por diversos autores.

Por exemplo, Castro *et al* (2004) analisaram os riscos a que uma distribuidora estaria exposta ao prever seu mercado com comportamento das diversas classes de consumo decorrente das Leis n. 10.848, de março de 2004, e do Decreto n. 5.163, de julho de 2004, onde o governo estabeleceu as diretrizes para construção de outro modelo para o setor elétrico, buscando a segurança no suprimento, modicidade tarifária e universalização do atendimento. Segundo as novas regras, as distribuidoras deverão atender a 100% do seu mercado, mediante contratação

regulada e aquisição da energia por meio de leilões, além de serem obrigadas a prever seus mercados com antecedência de cinco anos. Para mensurar os riscos os autores utilizaram a Simulação de Monte Carlo. Para cada caso, efetuaram 1000 simulações variando as incertezas no mercado e no preço futuro de compra da energia.

SALLES (2004) propôs a aplicação de duas metodologias de análise financeira de projetos de geração eólica que permitem a consideração explícita de incertezas associadas à velocidade do vento. A primeira baseou-se na Simulação de Monte Carlo e a segunda no método de séries temporais de Box e Jenkins (B&J). Diversos cenários foram gerados para se realizar a análise de risco financeiro, possibilitando o cálculo do valor esperado de indicadores financeiros, da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do Valor Presente Líquido (VPL) do projeto, além de suas distribuições de probabilidade empírica.

Bentes-Gama *et al* (2005) realizaram a análise de risco de investimento por meio da simulação de Monte Carlo em sistemas agrossilvopastoris (SAFs) implantados em 1987, no Campo Experimental da Embrapa Rondônia, localizado no município de Machadinho d'Oeste, RO.

COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* (2008) analisaram com o método de Monte Carlo as situações de risco de um sistema agrossilvopastoril. Realizaram 10.000 interações entre as variáveis que compõem o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Benefício Periódico Equivalente (BPE), a fim de montar uma distribuição de probabilidade. Os resultados indicaram que as análises das variáveis de saída apresentaram resultados melhores do que os obtidos pelos métodos determinísticos; que os preços do boi gordo e do carvão vegetal foram os componentes do sistema agrossilvopastoril que mais contribuíram para a variação e a instabilidade das variáveis de saída; e que o investimento no sistema agrossilvopastoril é de baixo risco.

### 2.3.3 Metodologia para o cálculo do custo de capital - ANEEL

A opção feita pela ANEEL para o cálculo do custo de capital é o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC) em combinação com o “Capital Asset Pricing Model” (CAPM) (ANEEL - c, 2014):

- De acordo com esse modelo, a taxa de retorno de um empreendimento é uma média ponderada dos custos dos diversos tipos de capital, com pesos iguais à participação de cada tipo de capital no valor total dos ativos do empreendimento. Assim, o método WACC procura refletir o custo médio das diferentes alternativas de financiamento (capital próprio e de terceiros) disponíveis para o empreendimento;
- A estrutura de capital diz respeito às participações de capital próprio e de capital de terceiros no capital total investido por uma empresa. A definição de uma estrutura ótima de capital tem por objetivo estabelecer uma estrutura de capital consistente com os fins da regulação econômica por incentivos e não necessariamente se confunde com a estrutura de capital efetiva da empresa;
- O CAPM assume que o prêmio de risco requerido pela ação é proporcional ao seu coeficiente beta, que mede a volatilidade e indica a variação do retorno da ação de uma determinada empresa em relação ao comportamento do mercado acionário. Para a aplicação do modelo CAPM é necessário calcular o custo de capital próprio de maneira construtiva, começando pela taxa livre de risco, que representa o prêmio de liquidez, adicionando-se os prêmios referentes a cada risco associado ao capital próprio aplicado em um empreendimento de geração de energia elétrica (prêmios de risco do negócio, financeiro e risco país);
- A taxa livre de risco é a remuneração referente ao custo do tempo, isto é, a remuneração exigida pelo investidor por abrir mão da liquidez corrente em troca de liquidez futura: é o retorno esperado pelo investidor em manter um ativo que não apresenta qualquer risco associado;
- O prêmio de risco de mercado mede a diferença entre o retorno esperado no mercado acionário (investimento com risco) e o retorno de títulos livre de risco. Para se estimar o prêmio de risco de mercado, subtrai-se a taxa livre de risco do retorno médio anual da série histórica dos retornos do portfólio do mercado de referência. No caso de se usar os Estados Unidos como mercado de referência, uma boa proxy de um portfólio de mercado é o S&P500, que consiste em um índice composto pelas ações das 500

maiores empresas negociadas na Bolsa de Nova York. Para a estimativa do prêmio por risco do mercado, devem ser considerados dois aspectos importantes: o período que será tomado como referência e a técnica estatística utilizada para o cálculo das médias. Em razão da volatilidade excessiva existente no mercado acionário, no qual um único evento na economia (choque inflacionário; políticas fiscais e monetárias; condições adversas no mercado de capitais) ocasiona mudanças bruscas na percepção de risco pelo investidor, o uso de períodos muito curtos pode levar a estimativas de retorno do capital erradas. Por esta razão, para este componente de risco deve-se considerar um período o mais extenso possível, havendo disponibilidade de dados, como uma maneira de eliminar estas anomalias, basicamente relacionadas com o ciclo econômico;

- O beta reflete os diversos tipos de risco: o risco do negócio e o risco financeiro. O risco do negócio pode ser definido como o grau de incerteza em relação à projeção do retorno sobre o ativo total inerente ao negócio, que não pode ser eliminado por diversificação. Em linguagem técnica, é o risco sistemático (não diversificável) quando todo o capital da empresa é capital próprio. O risco financeiro é o risco adicional devido ao uso de capital de terceiros no financiamento do projeto, isto é, o risco adicionado ao projeto devido à alavancagem financeira. O cálculo do beta a ser utilizado para a determinação da taxa de retorno envolve o cálculo do beta de empresas pertencentes ao setor regulado de interesse e ao mercado de referência (empresas de transmissão de energia elétrica nos Estados Unidos) e a posterior desalavancagem desses betas utilizando o grau de alavancagem das empresas do mercado de referência e a alíquota de imposto aplicável, no mercado de referência;
- Através da realavancagem do beta calculado acima pela estrutura de capital definida no valor de 50%, chega-se a um beta realavancado que multiplicado pelo prêmio de risco de mercado, resulta num prêmio de risco do negócio e financeiro;
- O risco país pode ser entendido como o risco adicional que um projeto incorre ao ser desenvolvido em um determinado país de economia emergente e instável, ao invés de em um país com economia desenvolvida, estável e de risco zero (ou o mais próximo de zero possível). No jargão financeiro, é entendido como o diferencial da paridade coberta das taxas de juros, que afeta os rendimentos de todos os ativos financeiros emitidos em um dado país;

- No modelo considerado, a ANEEL entende que não deve ser incluído um prêmio adicional de risco cambial. Diversas contribuições foram recebidas sob o argumento de existir evidências da existência de um prêmio de risco cambial adicional ao se comparar títulos brasileiros denominados em dólar e em reais. Entende-se que o prêmio de risco cambial observado nesses títulos de longo prazo decorre basicamente da incerteza em relação ao comportamento da inflação brasileira ao longo da existência do título, uma vez que a desvalorização do real frente ao dólar devido à deterioração de fundamentos macroeconômicos, desajustes fiscais, saldo do balanço de pagamentos, possibilidade de ataques especulativos, dentre outros, deve ser compensada pelo diferencial da paridade;
- A ANEEL entende que toda atividade econômica é exercida sob um maior ou menor grau de regulação do Estado. O exercício dessa regulação afeta a percepção de risco das atividades desenvolvidas no país, alterando a precificação dos ativos e as taxas de juros implícitas nessas precificações. A ANEEL reitera o argumento de que essa percepção de risco regulatório em nível nacional já está refletida no risco país, ajustando a relação entre o mercado americano e o mercado brasileiro;
- Como as tarifas são reajustadas por um índice de inflação, interessa ter o custo de capital exposto em termos reais. Algumas contribuições sugeriram a adoção da expectativa de inflação do FED no lugar da inflação histórica considerada. Tais contribuições não foram acatadas, pois não consideramos prudente determinar alguns componentes do modelo CAPM através de valores históricos e outros através de expectativas, pois isso poderia gerar resultados não realistas;
- O custo do capital de terceiros é o retorno que os credores da dívida da empresa demandam ao realizar novos empréstimos a esta. Pode-se calcular o custo de capital de terceiros nominal a partir das últimas emissões de dívida feitas por empresas do setor de interesse. Uma forma alternativa de estimá-lo, caso não haja um número suficiente e regular de emissões, seria a partir da taxa livre de risco mais os prêmios associados aos diversos riscos de empréstimos ao setor regulado de interesse: risco de crédito e risco país. Para o custo de capital de terceiros, a ANEEL propõe uma abordagem similar à do capital próprio, ou seja, trata-se de adicionar à taxa livre de risco os prêmios de risco adicionais exigidos para se emprestar recursos a uma concessionária de geração no Brasil. Esse enfoque impede que as tarifas sejam afetadas por uma gestão financeira imprudente na captação de recursos de terceiros ou

por decisões de captação de dívidas vinculadas a outros interesses, contrários à eficiência máxima;

- A partir dos resultados apresentados anteriormente, pode-se enfim calcular a taxa de retorno adequada para os serviços de geração de energia elétrica no Brasil através do Custo Médio Ponderado de Capital (WACC).

#### **2.3.4 Alguns estudos internacionais relacionados com opções reais**

Insley (2002) usou a teoria das opções reais para modelar a decisão ideal de colheita de árvores. O valor da opção foi estimado utilizando uma abordagem de programação dinâmica e uma técnica de solução numérica geral adequada para qualquer tipo de processo estocástico para os preços. Foram examinadas as condições sob as quais o tempo de colheita ideal foi independente do preço. Além disso, considerou-se o impacto de assumir preços futuros de madeira se reverter à média. Verificou-se que o valor da opção e o tempo ótimo de corte são significativamente diferentes sob a suposição de reversão à média em comparação com o movimento browniano geométrico.

Insley & Rollins (2003) desenvolveram um modelo de opções reais de dois fatores para a decisão de colheita com rotações infinitas com reversão à média de preços estocásticos usando o método de Hamilton-Bellman. O problema de colheita foi formulado como um problema de complementaridade linear que é resolvido numericamente usando uma diferença finita totalmente implícita no método. Esta abordagem foi contrastada com os modelos de Processo de Decisão Markov citados na literatura. O modelo foi usado para examinar um investimento proposto em manejo florestal nas florestas boreais de Ontário.

Duku-Kaakyire & David M. Nanang (2004) demonstram a utilidade da abordagem de opções reais para a análise de investimentos florestais. Os principais objetivos do trabalho foram discutir a teoria da opção real e mostrar como ela pode ser adotada para modelar a incerteza e a flexibilidade gerencial na gestão e investimento de uma floresta, mostrar como calcular os valores das opções selecionadas que podem estar disponíveis para gestores de empresas da indústria florestal. Foram utilizadas quatro opções de gestão para a abordagem de opções reais: de adiar o reflorestamento, de ampliar o tamanho da usina de processamento de madeira, de abandonar a planta se os preços da madeira caírem abaixo de um determinado nível ou devido à aquisição corporativa, e várias opções que avaliaram as três opções juntos. Os resultados mostram que a análise de Faustmann rejeitou os investimentos como não

rentáveis. A análise da opção mostrou que as três opções eram altamente valiosas se exercidas.

Cunha & Fontes (2004) apresentaram um modelo de decisões de colheita de árvores usando a teoria das opções reais, com o objetivo de encontrar o momento ótimo de colheita de eucalipto para maximizar os resultados esperados. Para definição do modelo consideraram: (a) as árvores com menos de sete anos de idade não atendem às exigências dos produtores de celulose; (b) as árvores com mais de quinze anos têm um diâmetro demasiado grande para processamento industrial; e (c) eucaliptos permitem duas rotações, uma vez que as árvores plantadas no início do projeto foram adequadas para dois cortes. A dependência do caminho de opções foi então observada, já que o momento do exercício da primeira opção (primeira colheita) determina o intervalo de tempo em que o segundo pode ser exercido. Além disso, consideraram também a opção de abandonar projetos e a opção de converter terra para outro uso. A idéia básica foi aproximar o preço por uma distribuição binomial e em seguida, estabelecer uma malha binomial de valor discreto de possíveis valores futuros de preços de venda.

Morgan *et al* (2007) utilizaram a abordagem das opções reais para desenvolver uma metodologia para avaliar uma decisão de gestão de recursos para interromper a colheita de madeira em uma população de Caribu (*Rangifer tarandus caribou*) em processo de ameaça de extinção, na região de Labrador central, Canadá. Nesta região, tanto a madeira de caribu, como a atividade de colheita de madeira, são valorizados. Justificaram a utilização da Teoria das Opções Reais por ser uma teoria base para decisões que incorpora desenvolvimentos futuros, e desta forma, fornece uma técnica que pode incorporar a incerteza ecológica e social no processo de decisão de gestão florestal. Como resultado, objetivaram reduzir o risco de um gerente florestal tomar decisão com resultados irreversíveis indesejáveis.

Szolgayova *et al* (2008) utilizaram os modelos de opções reais para avaliar o impacto de diferentes políticas de mudança climática em projetos de investimento, lucros e emissões cumulativas no setor elétrico. Nas suas análises, mostraram que os limites de preços de CO<sub>2</sub> estabelecidos a um nível demasiado baixo são prejudiciais para a adoção da, por exemplo, biomassa como um combustível substituto para as centrais a carvão existentes. Assim, realizaram uma série de experimentos com diferentes cenários de políticas para analisar sob qual regime as emissões foram reduzidas mais efetivamente. Concluíram que quando considerada a incerteza dos preços de CO<sub>2</sub>, os estudos conduziram frequentemente para o exercício de investimentos em captura e armazenamento de carbono. E que os investimentos

não seriam exercidos se considerados métodos tradicionais de análise que consideram preços determinísticos de CO<sub>2</sub>.

Frey *et al* (2009) utilizaram um método de diferenças reais parciais para determinar os preços de mudança e limiares de retorno entre agricultura e silvicultura e agricultura e agrossilvicultura para tipos específicos de terras marginais no vale inferior do rio Mississippi, que foi a maior área coberta de florestas continentais nos Estados Unidos, mas sofreu uma perda generalizada de florestas pela utilização das terras para fins agrícolas. Argumentam que um bom gestor de terras deve considerar na sua decisão as opções de adiar ou alterar a fim de se adaptar as possibilidades de mudança e que o método de Custo-benefício (VPL, SEV, etc.) assume retornos deterministas e que as decisões dos agricultores são estáticas.

Lee (2011) explorou o potencial de ganhos de comercialização de créditos de carbono decorrente da aprovação de uma legislação sobre mudanças climáticas, denominada NZETS (New Zealand Emissions Trading Scheme) pelo governo da Nova Zelândia em 2008. Esta legislação possibilitou que novas florestas fossem plantadas a partir de 01 de Janeiro de 1990 (conhecidas como florestas pós-1989), com direito de serem elegíveis para gerar créditos de carbono, créditos estes que poderiam ser vendidos em nível nacional e internacional. Utilizaram os métodos de valorização de NPV / LEV e opções reais, respectivamente, para analisar as decisões de manejo florestal fixo e de manejo flexível considerando que o NZETS iria muito provavelmente prolongar a idade de rotação das florestas e aumentar o sequestro de carbono florestal. Concluíram que o método de avaliação das opções reais pode gerar limites de preço de colheita ótimos que ajudam os proprietários florestais a decidir quando colher.

Martinez-Ceseña & Mutale (2011) propuseram a aplicação da Teoria de Opções Reais para o planejamento de projetos de geração de energia elétrica usando variações de um estudo de caso hidrelétrico. Consideraram que os tradicionais métodos de análise, ao negligenciar possíveis flexibilidades, podem tornar os projetos de geração de energia renovável pouco atraentes em um momento crescente de interesse neste tipo de geração. Os resultados dos seus estudos mostraram maiores lucros esperados para projetos planejados com a aplicação da metodologia de opções reais.

Musshoff (2012) analisou pela abordagem da Teoria de Opções Reais, a utilização de terras na Alemanha para cultivo de madeira em ciclos curtos, atividade que não era praticada na região de estudo, região esta caracterizada por solos arenosos com pouca capacidade de armazenamento de água. Os resultados mostraram que os agricultores não devem optar por

este tipo de cultura até que o valor presente dos retornos de investimento exceda consideravelmente os custos de investimentos, confirmando a relutância empiricamente observada para esta conversão.

Corato *et al* (2013) utilizaram as opções reais para analisar decisões dos agricultores em investir em fontes de energia renováveis que podem contribuir para diminuir as alterações climáticas. Os elevados custos envolvidos, retornos líquidos altamente incertos e incentivos induzidos pelas políticas não são atraentes para a decisão dos agricultores de mudar de agricultura para a silvicultura energética. No estudo, foram modelados a otimização do tempo de investimento e o funcionamento dos subsídios do governo com objetivo de acelerar a mudança para a silvicultura energética. Concluíram para o município de Enköping que a combinação de subsídios governamentais para a silvicultura energética com compensação pelo tratamento de lamas de esgoto constitui um estímulo para o investimento em novos plantios de salgueiro, com consequentes benefícios ambientais.

Want *et al* (2014) aplicaram a Teoria de Opções Reais para avaliar investimento para a produção de energia de biomassa utilizando palha na China. Usaram um método baseado na probabilidade cumulativa e árvore de decisão binomial para o exercício de opções com o objetivo de avaliar o momento ideal de investimento. Foram analisados dois cenários para identificar a estratégia de investimento ideal com e sem a consideração de receitas provenientes da redução certificada de emissões. Basearam na incerteza do preço de compra de palha, nos incentivos de governo e em melhorias tecnológicas. Os resultados mostraram que não seria viável o investimento imediato na produção de energia com esta biomassa na China. Se considerado o pleno subsídio do governo, o investimento desta biomassa para a produção de energia elétrica seria exercido em 2022 e 2028, considerando ou não as receitas provenientes da comercialização de CO<sub>2</sub>.

Yemshanov *et al* (2015) estudaram sob a abordagem da Teoria das Opções Reais a alternativa de uso florestal para as terras agrícolas privadas, na região de Alberta, Canadá, assumindo que os modelos desta transição com base no valor presente líquido têm sido criticados por não refletirem a amplitude das considerações econômicas relevantes para as decisões. Concluíram que as estimativas de elasticidade da conversão de terras agrícolas para o plantio de florestas foram semelhantes a outras estimativas econométricas apresentadas em estudos norte-americanos.

Regan *et al* (2015) estudaram sob a perspectiva das opções reais a decisão de uso de terras agrícolas no sul da Austrália. Compararam os resultados com os obtidos com a aplicação dos métodos de fluxo de caixa descontado no uso e gestão da terra, discutindo seus benefícios e limitações. Concluíram que, considerando os valores das opções, o desenho de políticas proporcionou uma avaliação mais realista da tomada de decisões.

Xian *et al* (2015) estudaram com base na Teoria de Opções Reais, a possibilidade dos EUA utilizarem pellets de madeira junto com o carvão para a geração de energia elétrica, a exemplo da UE. Utilizaram dados de preços de combustíveis em duas séries históricas (2009 – 2011 e 2012 – 2014). Concluíram, com base nos preços de gás natural, que esta utilização só foi viável sob uma baixa taxa de juros e empreendimentos com longa vida útil, ou com subsídios governamentais.

Presley & Boqiang (2016) avaliaram sob a abordagem da Teoria das Opções Reais, a flexibilidade em relação à implantação de projetos de energia eólica na China com base em custos estocásticos de fontes não renováveis, sustentando, inclusive, as vantagens da redução das emissões de dióxido de carbono. O estudo mostrou que há opções substanciais de valor para o programa de energia eólica da China, destacando o papel significativo da geração eólica para se atingir as metas de emissão e segurança energética, em um processo importante para uma transição energética sustentável naquele país.

Zhang *et al* (2016) propuseram um modelo de opções reais para avaliar um investimento na China para a geração de energia de biomassa. Foram consideradas as incertezas do preço de mercado da eletricidade, do preço do CO<sub>2</sub> e o preço da palha, e ainda a relação dinâmica entre a capacidade instalada e o custo do combustível, bem como a redução do subsídio no longo prazo. Foram analisados dois cenários, o primeiro com o comércio de emissões de carbono, e o segundo, sem. A base do estudo foi um projeto de geração de energia com palha de 25 MW. Os resultados mostraram que os investidores devem investir em 2030 sob estes dois cenários. A aplicação do regime de comércio de emissões de carbono teoricamente deve contribuir para melhorar o valor do investimento e para antecipar o tempo ideal mais provável de investimento. O preço à época do estudo do CO<sub>2</sub> não foi suficiente para antecipar o tempo ideal mais provável de investimento. Este trabalho sugeriu que o governo tome algumas medidas, incluindo o aumento e expansão do subsídio e o estabelecimento e aperfeiçoamento de um mercado nacional de comércio, para melhorar o ambiente de investimento e atrair mais investimentos.

De acordo com Cheng & Shaowen (2016), o projeto de investimento florestal tem as características típicas, tais como a flexibilidade, fases, incerteza. A avaliação tradicional do projeto de investimento florestal adota, em sua maioria, o método do valor presente líquido e ignora a propriedade da opção do projeto de investimento florestal, o que é fácil de causar viés de decisão e julgamento errôneo. Seus artigos analisaram as características de opção real do investimento florestal baseado na teoria da árvore binomial e a qualidade de metodologia de análise. Concluíram que a decisão do projeto de investimento florestal foi mais científica baseada no modelo de opção real.

### **2.3.5 Alguns estudos nacionais relacionados com opções reais**

Na área de geração de energia elétrica, Castro (2000) avaliou o investimento de capital em projetos de geração termelétrica no setor elétrico brasileiro usando a Teoria das Opções Reais. Considerou que uma térmica flexível pode estar sujeita a grande volatilidade do mercado à vista, mas também existem oportunidades para que grandes lucros sejam obtidos. Já as térmicas inflexíveis não terão sua energia despachada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conseqüentemente não atuarão no mercado à vista.

Gomes (2002) avaliou termelétricas no Brasil estudando o melhor momento de investimento por modelos de opções reais. A dinâmica de investimento foi estudada em três situações diferentes. Na primeira, foi utilizado um modelo de opções reais / análise de decisão para determinar as estratégias de escolha do melhor momento de construção de um empreendimento considerando que há incerteza exógena na expansão da oferta de termelétricas. Na segunda, utilizou o mesmo modelo para determinar as estratégias de momento de construção de uma termelétrica considerando que há incerteza na demanda, e que a expansão da oferta permanece constante. Na terceira, a expansão da oferta corre em resposta às incertezas e à interação entre os agentes.

Fontoura (2011) avaliou um projeto de investimento em usina termelétrica à capim-elefante usando uma abordagem pela Teoria de Opções Reais. Os resultados obtidos indicaram que a existência de incertezas e flexibilidades gerenciais aumentam o valor do projeto e reduzem significativamente o risco de insucesso, o que reforça a ideia de que a avaliação por opções reais, apesar de mais complexa, pode ser mais adequada para determinar o real valor do projeto.

Relacionados à agroindústria, Bastian-Pinto (2009) apresentou em sua tese de doutorado modelagens de opções reais com processos de reversão à média em tempo discreto com aplicação na indústria brasileira de Etanol. Este autor, em conjunto com Brandão e Hahn, no seu trabalho *Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case* (BASTIAN-PINTO *et al*, 2009), estudou a opção de alternar produtos de saída com base nos respectivos sinais de preços de duas commodities, açúcar (uma das commodities de alimentos) e etanol (uma commodity energética), em tempo discreto como uma árvore bivariável.

Dias *et al* (2011) estudaram a opção de gerar energia elétrica como expansão da produção de açúcar e etanol considerando esta uma função dos preços futuros esperados para estes dois produtos, ao passo que, por outro lado, a decisão de investir na planta de cogeração dependerá dos preços futuros de energia. Ambas as decisões foram modeladas como opções compostas americanas sobre seus respectivos ativos subjacentes.

Especificamente na área florestal, são poucos os estudos realizados aplicando a Teoria de Opções Reais relacionando-se à produção de madeira cultivada. Como exemplos, BARAN (2005), baseando-se na existência de um mercado para reduções de emissões de gases de efeito estufa criou uma nova variável a ser considerada na avaliação econômica de empreendimentos florestais, a absorção de CO<sub>2</sub>, e concluiu que a Teoria de Opções Reais mostrou-se a metodologia mais adequada a ser usada visto que o empreendimento florestal estudado (uma floresta de eucaliptos) era explorado em função de sua madeira e cuja função de crescimento era conhecida.

KERR *et al* (2009) fizeram uma avaliação de um investimento florestal, incluindo o tempo ótimo de colheita de madeira, considerando que preços de madeira seguem um processo de difusão estocástico. Utilizando de uma abordagem de opções reais com base em diferenças finitas totalmente implícitas e algoritmo *Projected Successive Over Relaxation*, concluíram que a avaliação associada à opção real embutida em projetos florestais não possui solução analítica fechada e, portanto, foi considerado um algoritmo para obtenção de uma solução numérica.

Joaquim *et al* (2015) analisaram a aplicação da Teoria das Opções Reais na análise de investimento em sistemas agroflorestais. Neste trabalho, os autores concluíram ser importante a utilização desta teoria no setor florestal, ser necessária a realização de novos estudos que

desenvolvam ou adaptem as equações seminais desenvolvidas por Dixit e Pindyck (1994) e se desenvolver adaptações do método proposto por Copeland & Antikarov (2001).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Base de dados

Para a geração de energia, foram previstas duas termelétricas com base em dados das empresas De Smet EMPRAL e CALDEMA (Sertãozinho – SP), tradicionais fornecedores de projetos e caldeiras para a geração de energia em termelétricas movidas a biomassa no Brasil:

- A primeira, com potência de 100MW, movida a cavacos de madeira. A segunda, com potência de 15MW, movida a gases de carbonização e a cavacos de madeira.
- Na segunda termelétrica foi prevista a utilização de gases de carbonização e de cavacos de madeira simultaneamente devido à necessidade de estabilidade na produção de vapor para movimentação das turbinas. A dinâmica operacional de uma unidade de produção de carvão e, por conseguinte, a dinâmica de geração destes gases, não é linear devido às características de produção e processo de carbonização.
- A termelétrica com potência de 100MW foi prevista com duas unidades de geração, cada uma com capacidade de geração unitária de 50MWh, totalizando 100MWh de geração bruta; consumo de 115,30 toneladas de cavacos de madeira de eucalipto por hora de geração, com umidade de 35%, para produzir 369 toneladas de vapor a 98 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e 528°C de temperatura.
- A caldeira da segunda termelétrica foi dimensionada para produção de vapor a 67 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e 515°C de temperatura. Com estes níveis de pressão e temperatura, são necessárias 58,65 toneladas de vapor por hora para a geração de 15 MWH. Esta produção de vapor é obtida pela combustão, em média, de 7,98 toneladas de gases de carbonização e 11,94 toneladas de cavacos de madeira (umidade de 35%). Para esta quantidade de gases de carbonização, considerou-se uma unidade de produção mensal de 4.875 toneladas de carvão (CETEC, 1980; BENEVITES *et al*, 2009; CGCC, 2015).

- Foi considerado o consumo de energia nas termelétricas para própria geração de 12%. Para manutenção geral, foi previsto uma interrupção de geração de 20 dias no ano e assumida uma eficiência operacional de 95%.

Todo processo operacional de geração de energia elétrica será mecanizado, dividido nas seguintes etapas: recebimento de madeira na planta termelétrica, em toneladas; cavaqueamento; combustão na caldeira e geração de vapor; geração de energia elétrica no conjunto turbina e gerador; despacho da energia.

Assumiu-se um raio máximo de transporte de madeira de 50 km, tendo como referência dados levantados nas visitas técnicas para a logística de transporte de madeira relacionado à decisão de localização das unidades de produção de carvão pela indústria siderúrgica a carvão vegetal, considerado adequado para a localização de uma termelétrica.

O potencial de energia para comercialização estimado no ano foi calculado utilizando a Equação 03 (De Smet EMPRAL, 2016):

$$GEL_{ano} = GEL_{hora} * (da - dmp) * hd * iep * (1 - cpt/100) \quad (03)$$

Onde:

$GEL_{ano}$  = Geração de Energia Líquida no ano, em MWano

$GEB_{hora}$  = Geração de Energia Bruta por hora, em MWh

$da$  = dias disponíveis de geração no ano

$dmp$  = dias programados para manutenção preventiva no ano

$hd$  = horas disponíveis de geração no dia

$iep$  = índice de eficiência operacional

$cpt$  = percentual da energia utilizado no processo de geração

O consumo de madeira por ano foi calculado utilizando a Equação 04:

$$CM_{ano} = CM_{hora} * GEB_{ano} \quad (04)$$

Onde:

$CM_{ano}$  = Consumo de madeira ano, em t

$CM_{hora}$  = Consumo de madeira hora, em t

$GEB_{ano}$  = Geração de Energia bruta no ano

Com estes dados, estimou-se para as termelétricas o número de horas de geração no ano, as gerações de energia potencial bruta, as gerações potenciais líquidas, as necessidades de madeira, de gases de carbonização e áreas cultivadas, apresentados na Tabela 08:

Tabela 08 – Unidade termelétrica, horas de geração, geração de energia total e líquida, consumo de madeira base seca e úmida (35% umidade), consumo de gases de carbonização e área cultivada necessária.

Termelétrica	Unidade	100MW	15MW
Horas de geração	h ano <sup>-1</sup>	7.866	7.866
Geração de Energia total	MWano <sup>-1</sup>	786.600	117.990
Geração líquida (comercializada)	MWh ano <sup>-1</sup>	692.208	103.831
Consumo total de madeira (35% umidade)	t ano <sup>-1</sup>	904.590	93.920
Consumo total de madeira (Base Seca)	t ano <sup>-1</sup>	587.984	61.048
Consumo de gases de carbonização	t ano <sup>-1</sup>	---	62.771
Área cultivada para atender as termelétricas (*)	ha	39.199	4.070

(\*) A necessidade de área considerou o cultivo em solos característicos de chapadas; cultivo de clones de eucalipto; aplicação de tecnologias que resultaram em uma produtividade média de 35m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>; adoção de ciclo florestal de 14 anos, rotação de 7 anos.

A variável incerta modelada para a avaliação da opção real foi o Fluxo de Caixa Descontado (FDC) estimado para cada termelétrica, método tradicional aplicado na avaliação de projetos (GOMES, 2002; BRASIL, 2007; SOUZA NETO, 2008; BASTIAN-PINTO, 2009; BRITO (2011), TATONI, 2012).

A receita total estimada foi o resultado do preço médio por MWh (CAPORAL & BRANDÃO, 2008; TATONI, 2012), multiplicado pelo total de MWh comercializado (geração líquida). O preço médio por MWh foi a média atualizada dos Preços de Liquidação das Diferenças (PLD), calculados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), utilizados na contratação de energia no mercado SPOT (CCEE, 2016). Assumiram-se os preços para as regiões Sudeste, dado ser esta região a responsável pelo maior consumo de energia elétrica no Brasil (EPE, 2016). Considerou-se um intervalo temporal de dez anos, mês a mês, de setembro de 2006 a agosto de 2016.

Os preços foram atualizados utilizando-se o IGP-M/FGV, índice atualmente empregado para balizar os aumentos de energia elétrica (PORTAL BRASIL, 2016). O último mês da série (agosto de 2016) considerado como base, foi igualado a 100, e aplicou-se a Equação 05 para determinar o IGP-M corrigido:

$$IGP-M_{corrigido} = \frac{IGP-M_{t-1} * Base}{IGP-M_t} \quad (05)$$

Onde:

$IGP-M_{t-1}$  = acumulado do mês anterior.

$Base = 100$

$IGP-M_t$  = acumulado do mês atual (base)

Calculado o IGP-M corrigido, foi determinado o novo valor do deflator, atualizado, utilizando-se a Equação 06:

$$Deflator = \frac{IGP-M_t}{IGP-M_{t-1}} \quad (06)$$

Onde:

$IGP-M_t$  = IGP – M corrigido base

$IGP-M_{(t-1)}$  = IGP – M corrigido ao ano

O preço médio do MWh foi calculado através da Equação 07:

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i^n}{n} \quad (07)$$

Onde:

$\bar{P}$  = Preço médio corrigido por KWh no mercado no intervalo temporal considerado

$\sum P_i^n$  = Somatório dos preços corrigidos no intervalo temporal considerado

$n$  = número de preços considerados

Foram considerados os percentuais de deduções da receita de 0,65% (PIS) e 3,00% (COFINS), conforme Gomes (2002), Brasil (2007), Souza Neto (2008), Bastian-Pinto (2009), Tatoni (2012); e Taxa de fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE) calculada conforme orientação da ANEEL (ANEEL - a, 2016).

Para a operação da termelétrica de 15MW de potência em três turnos, foi considerada uma equipe de 3 operadores de caldeira, 3 operadores de gerador e 6 controladores de geração. Para a produção de cavacos, em dois turnos, 2 operadores do cavaqueador, 4 ajudantes e 2 operadores de carregadeira de lenha. À equipe foram somados 4 colaboradores para cobrir folgas.

Para a operação da termelétrica de 100MW de potência em três turnos, foi considerada uma equipe de 6 operadores de caldeira, 9 operadores de gerador e 12 controladores de geração. Para a produção de cavacos, em dois turnos, 4 operadores do cavaqueador, 8 ajudantes e 4 operadores de carregadeira de lenha. À equipe foram somados 7 colaboradores para cobrir folgas.

A base da remuneração salarial mensal foi o valor do salário mínimo vigente em setembro de 2016, acrescido de 73,44% de encargos sociais, conforme Sistema Nacional de custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2015). Para a operação em três turnos foi considerada a folga dos colaboradores. Assumiu-se que todos os operadores receberam 3 salários mínimos (SM) de remuneração mensal, os controladores, 2 SM, e os ajudantes de produção, 1,5 SM.

O quantitativo da força de trabalho e o valor correspondente foram estabelecidos conforme observado em visita técnica a termelétricas a biomassa movidas a bagaço de cana, que têm os mesmos princípios técnicos das termelétricas projetadas para este estudo. Os custos anuais foram acrescidos de custos de empresa (Administração e outros), conforme também observado nas visitas, sendo assumido o percentual de 15%.

Os custos de produção da madeira, base seca (BS), foram definidos conforme informações obtidas em empresas de referência no Brasil em cultivo de madeira de eucalipto, não sendo citadas respeitando o direito de confidencialidade: R\$35,00/m<sup>3</sup>, madeira em pé; R\$24,00/m<sup>3</sup>, custo de colheita e transporte; R\$59,00/m<sup>3</sup>, custo total (R\$118,00/t custo total, considerando a densidade 0,5t/ m<sup>3</sup>). Estes custos já foram acrescidos de custos de empresa (Administração e outros), também assumidos em 15%.

A estimativa de investimento baseou-se em informações da empresa De Smet EMPRAL, na ordem de R\$5.500.000,00 por MW de potência instalada. O Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação (ANEEL - b, 2016) sugeriu a vida útil das caldeiras água-tubulares e conjuntos geradores de 25 anos e 30 anos, respectivamente. Estes equipamentos, acrescidos de obras civis, serviços de engenharia e montagem, representaram 75% do custo de

investimento. A partir destas informações, foi assumida a vida útil da termelétrica de 25 anos para efeitos de depreciação.

Sobre o lucro real, deduziu-se 25% de Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ) e 9% da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), conforme Gomes (2002), Brasil (2007), Souza Neto (2008), Bastian-Pinto (2009), Tatoni (2012).

### 3.2 Método de Análise

O processo de quatro passos proposto por Copeland & Antikarov (2001) foi sintetizado na Figura 17.

Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4
Cálculo do caso base, valor presente sem flexibilidade, aplicando o modelo de avaliação dos fluxos de caixa descontados.	Modelagem da incerteza por meio de árvores de eventos.	Identificar e incorporar flexibilidade gerencial, criando uma árvore de decisões.	Árvores de opções. Fazer a análise das opções reais (TOR)

Figura 17 – Abordagem geral do processo em quatro passos.

Fonte: COPELAND & ANTIKAROV, 2001.

No primeiro passo foi calculado o Fluxo de Caixa, assumindo as premissas de que o VPL tradicional foi a melhor alternativa não tendenciosa de valor de mercado do projeto se este fosse um ativo negociado, e de que ele não tem flexibilidade (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Os Fluxos de Caixa Livre anual foram projetados conforme Copeland & Antikarov (2001), Gomes (2002), Brasil (2007), Caporal & Brandão (2008), Souza neto (2008), Bastian-Pinto (2009) e Tatoni (2012). Assumidos como constantes em toda a vida útil do projeto, os fluxos de caixa foram repetidos para os primeiros dez anos (período explícito). A partir do décimo primeiro ano, considerou-se sua perpetuidade (período residual) (BRASIL, 2007; SOUZA NETO *et al*, 2008; BASTIAN-PINTO, 2009; ASSAF NETO, 2010). Este valor foi calculado aplicando a Equação 08:

$$FCL_{perpet_n} = \frac{FCL_n}{r} \quad (08)$$

Onde:

$VCL_{perpet_n}$  = Valor de perpetuidade no ano n

$FCL_n$  = Fluxo de Caixa no ano n

$r$  = taxa de risco ajustada ao risco

O Fluxo de Caixa Descontado (FCD) foi calculado conforme Brasil (2007), Samanez (2007), Souza Neto (2008), Bastian Pinto (2008), Motta & Calôba (2013), Rezende & Oliveira (2013), Hirschfeld (2013), Joaquim *et al* (2015), Equação 09:

$$FCD = \sum_{j=0}^n FCL (1 + r)^{-j} + VCL_{perpet_n} / r^{n+1} \quad (09)$$

Onde:

$FCD$  = Fluxo de Caixa Descontado

$VCL_{perpet_n}$  = Valor de perpetuidade no ano n

$FCL$  = Fluxo de Caixa Livre

$r$  = taxa ajustada ao risco

$n$  = 10 anos

A taxa de desconto ( $r$ ) adotada para este estudo foi a indicada pela ANEEL para determinação do custo de capital no cálculo da remuneração das instalações de geração de energia elétrica em regime de cotas. O cálculo foi o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC) em combinação com o “*Capital Asset Pricing Model*” (CAPM). A Estrutura ótima de Capital estabelecida foi a seguinte: Capital Próprio =  $(P/V)$  50,00%; Capital de Terceiros =  $(D/V)$  50,00%; Taxa Livre de Risco =  $r_f$  4,59%; Prêmio de risco de Mercado =  $r_m - r_f$  5,79%; Beta médio desalavancado =  $\beta_{RR\ Desalav}$  0,44; Beta médio alavancado =  $\beta_{RR\ Alav}$  0,73; Risco do Negócio =  $\beta \cdot (r_m - r_f)$  4,23%; Prêmio de risco país =  $r_B$  3,52%; Custo de capital próprio nominal =  $r_P$  12,34% ; Prêmio de Risco de Crédito =  $R_c$  2,93% ; Custo de Dívida Nominal =  $r_D$  11,03%; WACC real antes de impostos =  $r_{WACC}$  10,85% (ANEEL - c, 2014)

No segundo passo, foi modelada a incerteza por meio de árvore de eventos com o objetivo de entender como o valor presente evoluiu ao longo do tempo. Copeland & Antikarov (2001) afirmaram que uma das hipóteses mais simples é de que a incerteza (como preços incertos) segue um Movimento Geométrico Browniano (MGB), tendo como base que, inicialmente, não há autocorrelação. Desta forma, o valor no período seguinte foi igual ao valor neste

período, multiplicado por um fator de aumento contínuo, no intervalo de tempo considerado, assumindo que a taxa de aumento foi uma variável aleatória com distribuição normal e crescimento e desvio padrão constante.

Seguindo Gomes (2002), Brasil (2007), Caporal & Brandão (2008), Souza Neto (2008), Bastian-Pinto (2009) e Tatoní (2012), Joaquim *et al* (2015), considerou-se que o processo estocástico de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) seguiu um MGB, dado pela equação 10 (GOMES, 2002; CAPORAL & BRANDÃO, 2008; BASTIAN-PINTO, 2009), Equação 10:

$$dFCD = \mu FCD dt + \sigma FCD dz \quad (10)$$

Onde:

$FCD$  = Fluxo de Caixa Descontado no instante  $t$ ;

$\mu$  = taxa de crescimento de  $FCD$  [assumiu-se a taxa de crescimento (drift) do preço de energia elétrica no mercado SPOT no intervalo temporal da série histórica considerada];

$\sigma$  = volatilidade de  $FCD$  [assumiu como volatilidade o desvio padrão instantâneo do preço de energia elétrica no mercado SPOT no intervalo temporal da série histórica considerada];

$dz$  = incremento de um processo de Wiener

Conforme o modelo binomial de Cox, Ross & Rubinstein (1979), o processo estocástico contínuo do FCD foi substituído por um caminho aleatório discreto com dois estados “u” (*up*) e “d” (*down*). Estes estados corresponderam a uma alta e uma baixa do preço, considerando a probabilidade de ocorrência e a volatilidade (Figura 18). A modelagem discreta por árvore binomial recombinante, desenvolvida por estes autores para avaliar opções reais, encontrou ampla aceitação por generalizar o modelo de Black & Scholes (1973) devido à sua simplicidade de uso, flexibilidade e propriedade de convergir de forma fraca para um Movimento Geométrico Browniano, quando o passo no tempo diminui (BASTIAN-PINTO, 2009).

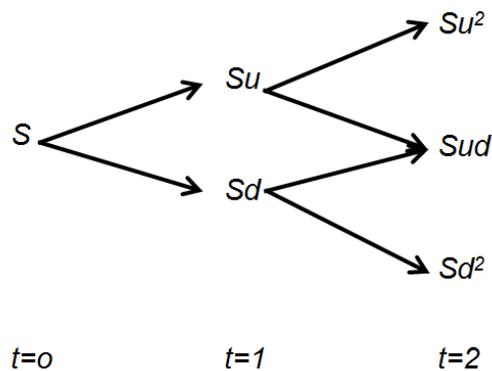


Figura 18 – Árvore Binomial proposta por Cox, Ross & Rubinstein (1979).

Acompanhando Bastian-Pinto (2009), Tatoni (2012) e Joaquim (2012), que utilizaram preços de séries históricas para a estimativa da volatilidade dos projetos estudados, a variação de preços de energia elétrica foi definida como a volatilidade para este estudo. Conforme apresentado na Figura 19, os preços corrigidos de energia elétrica no mercado SPOT apresentaram alta volatilidade no intervalo temporal considerado, o que está de acordo com os preços neste mercado no Brasil (LEITE *et al*, 2013). Conforme Copeland & Antikarov (2001), a alta volatilidade do ativo subjacente sujeito a risco e a incerteza aumentam o valor de uma opção.

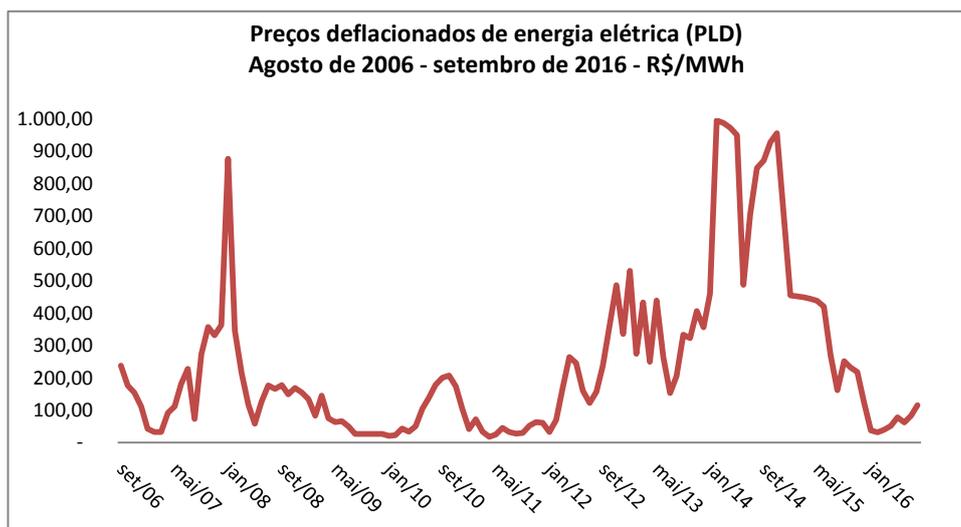


Figura 19 – Preços em reais deflacionados de energia elétrica (PLD), intervalo temporal de setembro de 2006 a agosto de 2007.

Os valores de energia elétrica no mercado livre encontrados foram os seguintes: média, R\$241,11MWh<sup>-1</sup>; desvio padrão, R\$247,08 MWh<sup>-1</sup>; preço máximo R\$995,21 MWh<sup>-1</sup>; preço mínimo, R\$17,32 MWh<sup>-1</sup>. Desvio padrão relativo, 102,48%.

Outra fonte de incerteza analisada quando da definição do parâmetro da volatilidade foi o custo da madeira. Optou-se por não considerá-lo à baixa variação de seus preços no mercado de madeira ao longo do tempo. Como referência, os preços corrigidos de madeira de eucalipto em pé em uma série histórica de 15 anos apresentou desvio padrão relativo à média de 13% (JOAQUIM *et al*, 2012).

Assumiu-se neste trabalho, portanto, a variação do preço de energia como a volatilidade do projeto. Esta foi calculada pela Equação 11, conforme Copeland & Antikarov (2001), acompanhando Bastian-Pinto (2004 e 2009), Brandão, Dyer & Hans (2005), Brasil (2007) e Joaquim *et al* (2015).

$$\sigma_{EE\ SPOT} = \text{DESVPAD} \left[ \ln \left( \frac{P_n}{P_{n-1}} \right) \right] \quad (11)$$

Onde:

$\sigma_{EE\ SPOT}$  = Volatilidade dos preços de energia no mercado SPOT (Variável de previsão “Z”);

ln = Logaritmo de base “e”, onde “e” é igual a 2,718 281... (Número de Euler), portanto, função inversa da função exponencial;

$P_n$  = Valor da energia no tempo  $t_n$

$P_{n-1}$  = Valor da energia no tempo  $t_{n-1}$

Com base no valor médio dos preços de energia e desvio o padrão calculado, foi obtida nova volatilidade para projetar o valor futuro esperado dessa variável, utilizando-se o método de simulação de Monte Carlo, (COPERLAND E ANTIKAROV, 2001).

Com base no valor médio dos preços de energia e desvio o padrão calculado foi obtida nova volatilidade utilizando-se o método de simulação de Monte Carlo, para projetar o valor futuro esperado dessa variável, sendo esta anualizada com a Equação 12 (COPERLAND E ANTIKAROV, 2001; BRASIL, 2007).

$$\sigma_{anual} = \sigma_{10\ anos} / \sqrt{10} \quad (12)$$

Onde:

$\sigma_{anual}$  = volatilidade anual

$\sigma_{10\text{ anos}}$  = volatilidade no intervalo temporal de dez anos

Os valores que determinaram os movimentos ascendentes “ $u$ ” e descendentes “ $d$ ” na árvore de eventos foram calculados de acordo com as Equações 13 e 14 deduzidas por Cox, Ross & Rubinstein (1979):

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (13) \quad \text{e} \quad d = 1/u \quad \text{ou} \quad d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (14)$$

Onde:

$u$  = movimento ascendente – valor que multiplica o projeto com uma evolução positiva. Será sempre maior que 1;

$d$  = movimento descendente assumido no momento 1 do projeto. Será sempre menor que 1;

$\sigma$  = volatilidade do projeto;

$e$  = Função exponencial (Número de Euler)

$\Delta t$  = variação do tempo de análise da volatilidade dos preços (10 anos).

Os fluxos de Caixa Descontado ascendentes e descendentes foram calculados conforme as Equações 15 e 16:

$$FCD\ asc = FCD_{n-1} * u \quad (15) \quad \text{e} \quad FCD\ desc = FCD_{n-1} * d \quad (16)$$

Onde:

$FCD\ asc$  = Fluxo de Caixa Descontado ascendente

$FCD\ n - 1$  = Fluxo de Caixa Descontado  $n - 1$

$FCD\ desc$  = Fluxo de Caixa Descontado descendente

$FCD\ n - 1$  = Fluxo de Caixa Descontado  $n - 1$

No terceiro passo foram incluídos nós de decisão na árvore de eventos, transformando-a em uma árvore de decisão. A flexibilidade gerencial definida foi exercer a opção de abandono a partir do segundo ano (opção de venda americana). A análise de opções de abandono proporcionou uma estimativa do valor do abandono ótimo (valor de recuperação) e também

indicou quando a opção de abandono deve ser exercida (COPELAND & ANTIKAROV, 2001). Assumiu-se como receita de recuperação 50% do valor do investimento ainda a depreciar no ano em análise baseando-se em informações da Sociedade Brasileira de Perícias e Avaliações (IBAPE, 2017).

A construção da árvore foi realizada a partir dos últimos períodos (T= 10) até o primeiro período. Para cada célula da última coluna (décimo período), a opção foi avaliada em relação aos valores do FCD apresentados na Árvore de Eventos nesta coluna, tanto para “u” quanto para “d”, conforme a Equação 17:

$$Vl FCD_{10^o\ ano} = Max [ X_{10^o\ ano} - FCD_{10^o\ ano}^{u\ ou\ d}; 0] \quad (17)$$

Onde:

$X_{10^o\ ano}$  = Valor de abandono (receita de recuperação) no décimo ano;

$Vl FCD_{10^o\ ano}$  = Valor do FCD da árvore de decisão no décimo ano;

$Vl FCD_{ar\ ev\ 10^o\ ano}^{u\ ou\ d}$  = Valor presente da árvore de eventos no décimo ano.

Nos nós subsequentes, a partir da última coluna, o valor do exercício (FCD expandido) foi encontrado aplicando-se a Equação 18:

$$Vl FCD_{n-1}^{u\ ou\ d} = Max [(X_{n+1} - ((Vl FCD_{n+1}^u * p_u) + (Vl FCD_{n+1}^d * p_d)))/e^{rf}; 0] \quad (18)$$

Onde:

$Vl FCD_{n-1}^{u\ ou\ d}$  = Fluxo de caixa descontado no nó em análise;

$X_{n+1}$  = Valor de abandono (receita de recuperação) no ano seguinte;

$Vl FCD_{n+1}^u$  = Fluxo de caixa ascendente no nó em seguinte;

$Vl FCD_{n+1}^d$  = Fluxo de caixa descendente no nó em seguinte;

$p_u$  = probabilidade objetiva de “u”;

$p_d = 1 - p_u$  = probabilidade objetiva de “d”;

$e^{rf}$  = Exponencial da taxa de juros neutra a riscos.

A opção de abandono foi analisada verificando-se o máximo valor do FCD em cada nó em relação ao valor de recuperação naquele nó [ $MAX (u^n V, X)$ ]. Se o máximo valor do FCD for maior que o valor de recuperação ( $u^n V > X$ ), prossegue-se com o projeto. Se não ( $u^n V < X$ ), abandona-se.

As probabilidades objetivas de “u” ( $p_u$ ) e de “d” ( $p_d$ ) foram calculadas conforme as Equações 19 e 20 (COX, ROSS & RUBINSTEIN, 1979):

$$p_u = \frac{e^{r-d}}{(u-d)} \quad (19) \quad \text{e} \quad p_d = 1 - p_u \quad (20)$$

Onde:

$e^r$  = Exponencial da taxa de juros ajustada ao risco.

A Equação 19 foi deduzida por haver uma triangularidade implícita entre preço corrente do ativo subjacente, os retornos esperados ao final do período (que estão alicerçados na volatilidade do projeto), o custo de capital e as probabilidades objetivas da subida e da descida (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Retornado os valores na análise da Árvore de Decisão, determina-se o valor do projeto sob a incerteza, ou o FCD expandido, ou seja, FCD tradicional + o valor da opção, expresso pela Equação 21 (JOAQUIM *et al*, 2015):

$$FCD_{exp} = FCD_{Trad} + Vl_{OR} \quad (21)$$

Onde:

$FCD_{exp}$  = Fluxo de Caixa Descontado expandido

$FCD_{Trad}$  = Valor Presente Líquido tradicional

$Vl_{OR}$  = Valor da Opção Real

Invertendo os termos (Equação 22), determinou-se o valor da opção real decorrente da incerteza dos preços de energia elétrica analisados no mercado SPOT.

$$Vl_{OR} = FCD_{exp} - FCD_{Trad} \quad (22)$$

O método foi desenvolvido no ambiente Windows com utilização do *Microsoft Excel*® (COPELAND & ANTIKAROV, 2001; JOAQUIM *et al*, 2015).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as análises tradicionais de investimentos (REZENDE & OLIVEIRA, 2013), os fluxos de caixas descontados e as taxas de retornos estimadas dos projetos demonstraram suas viabilidades econômicas (Tabelas 09, 10, 11 e 12).

Tabela 09 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre anual, valor da perpetuidade, Fluxo de Caixa Descontado, termelétrica 100MW.

<b>FLUXO DE CAIXA LIVRE ANUAL – Termelétrica 100MW de potência</b>	<b>Em mil reais</b>
<b>Receita Bruta</b>	<b>166.896</b>
(-) impostos indiretos (PIS E COFINS)	6.092
<b>Receita Bruta - impostos indiretos</b>	<b>160.804</b>
<b>(-) Taxas do setor</b>	<b>258</b>
Taxa fiscalização da ANEEL (TFSEE)	258
<b>(=) Receita Líquida</b>	<b>160.546</b>
<b>(-) Custos Variáveis</b>	<b>76.967</b>
Madeira	69.382
Força de trabalho	2.085
Custo manutenção (1% investimento)	5.500
<b>(=) Margem de Contribuição</b>	
(-) Custos Fixos Desembolsáveis	
<b>(=) Lucro Antes de juros, taxas, depreciação e amortização</b>	<b>83.579</b>
(-) Depreciação	22.000
(-) Imposto de Renda e Contribuição Social sobre o Lucro Líquido	20.936
IRRF e CSLL	
<b>(=) Lucro líquido após Juros e Impostos</b>	<b>40.643</b>
(+) Depreciação	22.000
(±) ΔNCG (Variação da Necessidade de Capital de Giro)	0,00
<b>(=) Fluxo de Caixa Operacional</b>	<b>62.643</b>
(-) Capex (Investimentos)	0,00
(+) Valor Residual ou Terminal	0,00
<b>(=) Fluxo de Caixa operacional líquido</b>	<b>62.643</b>
Empréstimos	
(-) Pagamento de Juros	0,00
(-) Amortização de Empréstimos	0,00
(+) Efeito Fiscal	0,00
<b>(=) Fluxo de caixa Livre</b>	<b>62.643</b>

<b>Valor de Perpetuidade</b>	<b>577.348</b>
<b>Fluxo de Caixa Total</b>	<b>1.203.771</b>
<b>Valor de investimento</b>	<b>550.000</b>
<b>Fluxo de Caixa Descontado</b>	<b>557.175</b>
<b>Valor líquido para a Termelétrica 100MW de potência (ASSR)</b>	<b>7.175</b>
<b>Taxa Interna de Retorno</b>	<b>11,06%</b>

Tabela 10 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre no período, com os respectivos valores presentes, termelétrica 100MW de potência.

FLUXO DE CAIXA LIVRE NO PERÍODO – Termelétrica 100MW de potência											Em mil reais
TOTAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Perpetuidade
<b>1.203.771</b>	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	62.643	577.348
<b>557.175</b>	56.511	50.980	45.990	41.488	37.427	33.764	30.459	27.478	24.788	22.362	185.928

Tabela 11 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre anual, valor da perpetuidade, Fluxo de Caixa Descontado, termelétrica 15 MW de potência.

FLUXO DE CAIXA LIVRE ANUAL – Termelétrica 15 MW de potência	Em mil reais
<b>Receita Bruta</b>	<b>25.034</b>
(-) impostos indiretos (PIS E COFINS)	914
<b>Receita Bruta - impostos indiretos</b>	<b>24.120</b>
(-) Taxas do setor	<b>39</b>
Taxa fiscalização da ANEEL (TFSEE)	39
<b>(=) Receita Líquida</b>	<b>24.082</b>
(-) Custos Variáveis	<b>9.148</b>
Madeira	7.204
Força de trabalho	1.120
Custo manutenção (1% investimento)	825
<b>(=) Margem de Contribuição</b>	<b>14.933</b>
(-) Custos Fixos Desembolsáveis	
<b>(=) Lucro Antes de juros, taxas, depreciação e amortização</b>	<b>14.933</b>
(-) Depreciação	3.300
(-) Imposto de Renda e Contribuição Social sobre o Lucro Líquido	3.955
IRRF e CSLL	
<b>(=) Lucro líquido após Juros e Impostos</b>	<b>7.678</b>
(+) Depreciação	3.300
(±) ΔNCG (Variação da Necessidade de Capital de Giro)	0,00
<b>(=) Fluxo de Caixa Operacional</b>	<b>10.978</b>
(-) CAPEX (Investimentos)	<b>0,00</b>
(+) Valor Residual ou Terminal	<b>0,00</b>
<b>(=) Fluxo de Caixa operacional líquido</b>	<b>10.978</b>
Empréstimos	
(-) Pagamento de Juros	0,00
(-) Amortização de Empréstimos	0,00
(+) Efeito Fiscal	0,00
<b>(=) Fluxo de caixa Livre</b>	<b>10.978</b>

Continua...

Continuação

<b>Valor de Perpetuidade</b>	<b>101,181</b>
<b>Fluxo de Caixa Total</b>	<b>210.962</b>
<b>Valor de investimento</b>	<b>82.500</b>
<b>Fluxo de Caixa Descontado</b>	<b>97.645</b>
<b>Valor líquido para a Termelétrica 15MW de potência (ASSR)</b>	<b>15.145</b>
<b>Taxa Interna de Retorno</b>	<b>13,71%</b>

Tabela 12 – Estimativa dos Fluxos de Caixa Livre no período, com os respectivos valores presentes, termelétrica 15MW de potência.

FLUXO DE CAIXA LIVRE NO PERÍODO – Termelétrica 100MW de potência											Em mil reais
TOTAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Perpetuidade
<b>210.962</b>	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	10.978	101.181
<b>97.645</b>	9.904	8.934	8.060	7.271	6.559	5.917	5.338	4.816	4.344	3.919	32.584

A volatilidade do projeto, considerando o intervalo temporal da série de 10 anos, calculado conforme Copeland & Antikarov (2001) foi 0,4628. Aplicando a análise Monte Carlo a partir do valor médio de energia, R\$241,11MWh<sup>-1</sup>, foi encontrado o novo desvio padrão de 0,4661.

As Árvores de Eventos foram construídas a partir dos seguintes parâmetros (Figuras 20 e 21),

- ✓ Valor do projeto sem flexibilidade = ASSR
  - 557.175 milhões de reais – termelétrica potência 100MW
  - 97.645 milhões de reais – termelétrica potência 100MW
- ✓ Volatilidade =  $\sigma$  = de 0,1474 (0,4661 /  $\sqrt{10}$ )
- ✓ Movimento Ascendente = u = 1,158836237
- ✓ Movimento descendente = d = 0,862934699

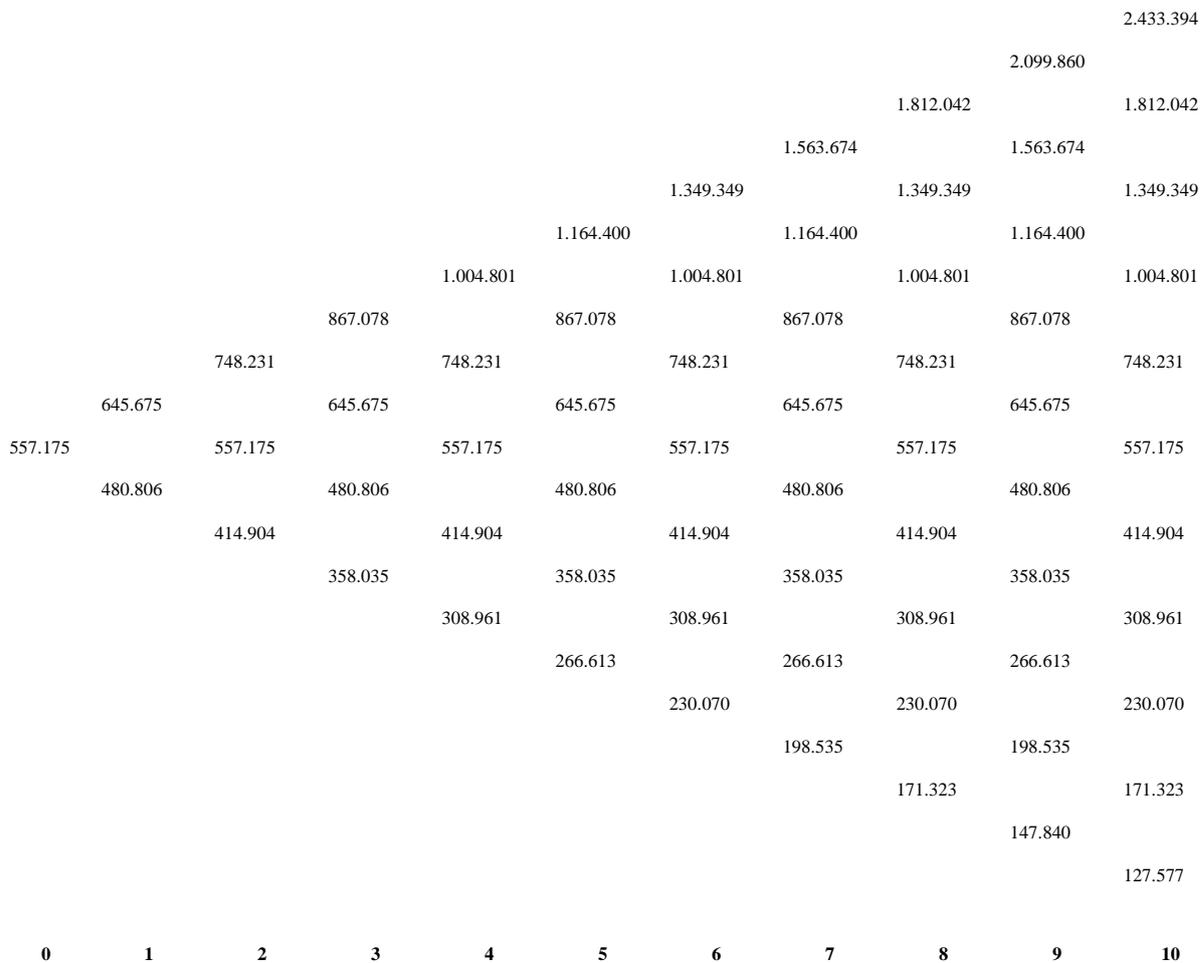


Figura 20 – Valores que o FCD assumiu na Árvore de Eventos \_ Termelétrica 100MW de potência (em R\$1.000,00).

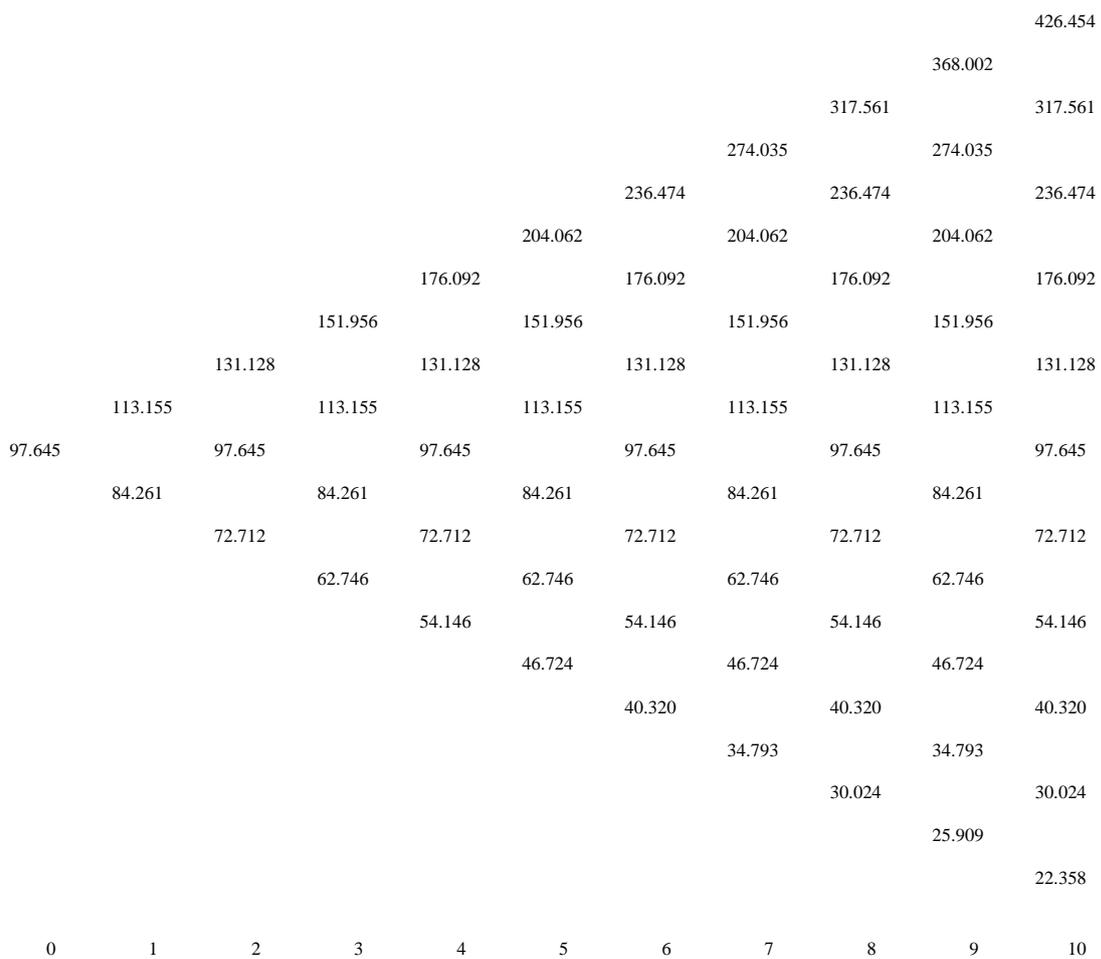


Figura 21 – Valores que o FCD assumiu na Árvore de Eventos \_ Termelétrica 15MW de potência (em R\$1.000,00).

Pode-se observar que os valores superiores e inferiores apresentados nas árvores de eventos, em relação ao ASSR, são absolutamente irrealistas se considerados os preços históricos no mercado SPOT de energia elétrica.

Relacionando-se esses valores com os valores apresentados em árvores de eventos por Brasil (2007), Souza Neto (2008), Bastian-Pinto (2009), Tatoni (2012), verificou-se que eles guardam semelhança em relação às suas ordens de grandeza.

Os valores de recuperação para a opção de abandono, valores presentes, foram os apresentados na Tabela 13 e 14:

Tabela 13 – Valores de recuperação pela venda de equipamentos para a opção de abandono (em R\$1.000,00), termelétrica 100MW de potência.

<b>Período</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Valor de Recuperação (VR)</b>	253.000	231.000	209.000	187.000	165.000	143.000	121.000	99.000	77.000
<b>VPL VR</b>	205.897	169.592	138.421	111.728	88.934	69.532	53.076	39.175	27.487

Tabela 14 – Valores de recuperação pela venda de equipamentos para a opção de abandono (em R\$1.000,00), termelétrica 15 MW de potência.

<b>Período</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Valor de Recuperação (VR)</b>	37.950	34.650	31.350	28.050	24.750	21.450	18.150	14.850	11.550
<b>VPL VR</b>	30.884	25.439	20.763	16.759	13.340	10.430	7.961	5.876	4.123

As Árvores de Decisão foram construídas com os seguintes parâmetros (Figura 22 e 23):

- ✓ Probabilidade objetiva de ocorrer os movimentos ascendentes = 0,8505
- ✓ Probabilidade objetiva de ocorrer os movimentos descendentes = 0,1495
- ✓ Taxa de juros livre de risco (rf) = 4,59%

										2.433.394	
										27.487	
									2.235.513		
									39.175		
								2.053.723		1.812.042	
								53.076		27.487	
								1.886.717		1.664.689	
								69.532		39.175	
						1.733.291		1.529.318		1.349.349	
						88.934		53.076		27.487	
					1.592.342		1.404.956		1.239.621		
					111.728		69.532		39.175		
				1.462.854		1.290.706		1.138.816		1.004.801	
				138.421		88.934		53.076		27.487	
			1.343.896		1.185.747		1.046.209		923.092		
			169.592		111.728		69.532		39.175		
		1.234.612		1.089.324		961.132		848.027		748.231	
		205.897		138.421		88.934		53.076		27.487	
	1.134.215		1.000.741		882.974		779.066		687.386		
			169.592		111.728		69.532		39.175		
1.041.982		919.362		811.172		715.713		631.488		557.175	
		205.897		138.421		88.934		53.076		27.487	
	844.600		745.208		657.512		580.136		511.866		
			169.592		111.728		69.532		39.175		
		684.608		604.044		532.960		470.242		414.904	
		205.897		138.421		88.934		53.076		27.487	
			554.924		489.621		432.002		381.164		
			169.592		111.728		69.532		39.175		
				449.805		396.872		350.169		308.961	
				138.421		88.934		53.076		27.487	
					364.599		321.693		283.836		
					111.728		69.532		39.175		
						295.533		260.755		230.070	
						88.934		53.076		27.487	
							239.551		211.361		
							69.532		39.175		
								194.173		171.323	
								53.076		27.487	
									157.391		
									39.175		
										127.577	
										27.487	
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	

Figura 22 – Valores obtidos na Árvore de Decisão empregando a abordagem da probabilidade neutra em relação ao risco \_ Termelétrica 100MW de potência, com os respectivos valores de abandono (em R\$1.000,00).



Pode-se observar nas árvores de decisão que todos os valores presentes da recuperação para as opções de abandono foram menores que os valores presentes dos FCD nos respectivos nós. Portanto, em nenhum período dos dois projetos esta opção foi exercida.

O valor do FCD expandido decorrente da volatilidade dos preços de energia foi de 1,042 bilhões de reais, 484,807 milhões de reais a mais do valor apresentado no fluxo de caixa descontado tradicional, no caso do projeto de 100MW; e de 182,608 milhões de reais, 84,963 milhões de reais a mais, no caso do projeto de 15MW.

As diferenças entre os valores dos Fluxos de Caixas Expandidos e os Fluxos de Caixas Descontados tradicionais, determinadas conforme o modelo de quatro passos proposto por Copeland & Antikarov (2001), foram as confirmações de que o segundo subestimou o valor total do projeto por desconsiderar a volatilidade dos preços de energia. Demonstraram, a princípio, que as decisões de investir nos projetos de termelétricas tiveram maior sustento com o uso da Teoria das Opções Reais.

Entretanto, se por um lado, os Fluxos de Caixas Expandidos dos projetos das termelétricas foram expressivos, por outro, o questionamento que se fez foi se esses resultados apresentaram razoabilidade econômica. Os acréscimos foram de 87,01% em relação aos Fluxos de Caixa Tradicional. Segundo Rosa (2006), autores pós-Keynesianos argumentam que as expectativas só fazem sentido se forem razoáveis.

Joaquim *et al* (2015), ao estudarem a aplicação da teoria das opções reais na análise de investimentos em sistemas agroflorestais, afirmaram que chegaram a valores absolutamente em desacordo com a realidade dos projetos agroflorestais. Concluíram que a aplicação do método seguindo os quatro passos propostos por Copeland & Antikavrov (2001) foi plausível, desde que algumas adaptações fossem realizadas para suprir as peculiaridades do projeto estudado. Situação semelhante pode-se ser considerada para as análises do presente trabalho.

A aplicação da Teoria de Opções Reais na análise de merece atenção especial. Sob a ótica desta teoria, inclusive o dimensionamento dos equipamentos para uma mesma geração de uma termelétrica precisa considerar as diversas flexibilidades potenciais. A geração com um único equipamento, por exemplo, tem tendência de apresentar ganhos em escala. Entretanto, se optar por mais de um equipamento para a mesma geração, pode-se considerar diminuir a geração em momentos de baixo preço de energia elétrica no mercado SPOT, além da possibilidade de interrupção total da geração, que são opções reais.

Nesse sentido, os fluxos de caixas livres mensais elaborados a partir dos valores corrigidos de energia elétrica, mantidos os custos constantes, foram expressivos em determinados períodos, e negativos em outros (Figura 24). Ou seja, com maior flexibilidade gerencial de geração, seria possível auferir maiores ganhos em períodos favoráveis, e evitar perdas em períodos desfavoráveis, considerando que o valor de depreciação do investimento necessário em uma termelétrica tem menor expressividade em relação aos custos de operação, conforme já apresentado.

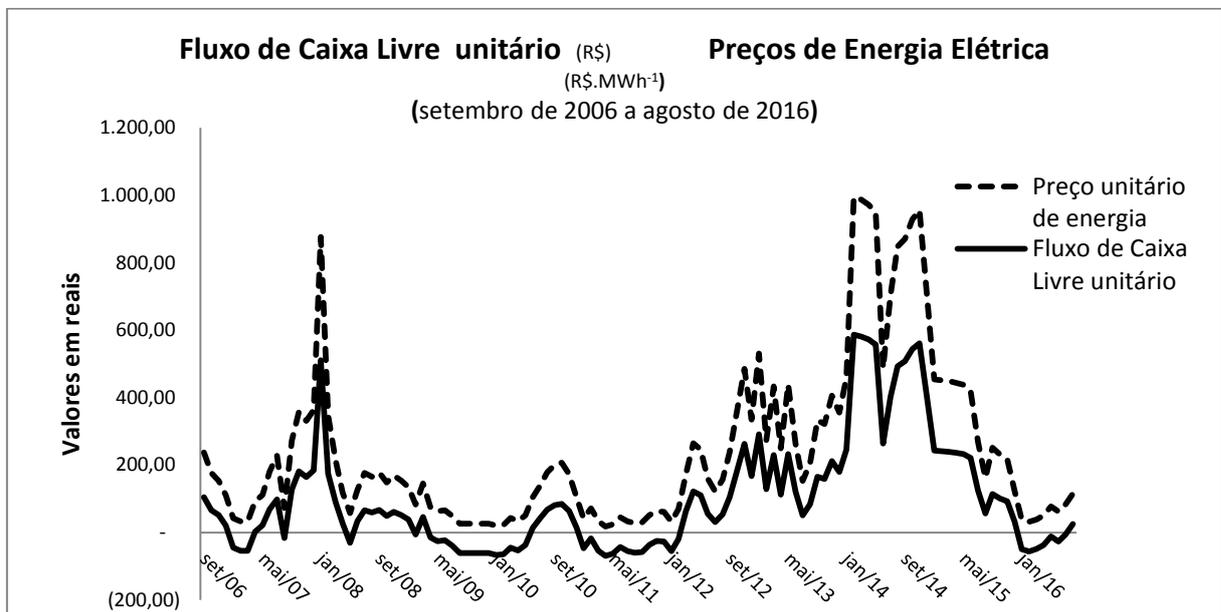


Figura 24 – Fluxo de Caixa Livre unitário proporcional a cada MWh comercializado e Preços de Energia Elétrica (R\$.MWh<sup>-1</sup>) do projeto de termelétrica de 15MW, intervalo temporal de setembro de 2006 a agosto de 2016.

Novos trabalhos precisam ser desenvolvidos no sentido de fazer adequações nos modelos já propostos, ou mesmo, propostas de novos modelos, para uma correta precificação das opções reais quando a incerteza do projeto de uma termelétrica for assumida como a incerteza de preços no mercado SPOT.

## **5 CONCLUSÕES**

A geração de energia nas termelétricas estudadas apresentou viabilidade econômica conforme as análises tradicionais de investimento.

A aplicação da Teoria de Opções Reais na análise dos projetos de geração de energia elétrica utilizando cavacos de madeira de eucalipto e gases de carbonização, especificamente do método de quatro passos proposto por Copeland e Antikarov (2001) para precificações de opções reais, foi plausível e apresentou vantagens em relação ao uso do tradicional Fluxo de Caixa Descontado (FCD). Entretanto, há necessidade de novos estudos objetivando adaptações ou novos modelos para atender as particularidades relacionadas ao mercado SPOT de energia elétrica.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerações finais decorrente dos estudos e visitas técnicas realizadas para embasar esta tese.

1. Quanto à geração de energia em termelétricas movidas a cavacos de eucalipto:
  - Todas as informações obtidas, sejam na literatura ou meios de comunicação, sejam nas publicações relacionadas ao setor de energia elétrica, ou nas visitas técnicas, levam a inferência que a geração de energia elétrica em termelétricas movidas a cavacos de madeira deve vir a ser uma grande oportunidade para o surgimento de um novo setor de madeira cultivada, com nível de importância semelhante aos setores de produção de papel e celulose e de carvão vegetal.
  - Esta possibilidade torna-se ainda mais relevante quando este setor se relaciona com o potencial de geração de emprego e renda em regiões, hoje, economicamente marginalizadas devido às limitações de solo e clima, ou que tem a produção agropecuária limitada pela declividade dos seus terrenos que dificulta a mecanização de atividades.
  - A tecnologia de geração de energia em termelétricas movidas a cavacos de madeira pode ser a mesma já consolidada há anos pela indústria sucroalcooleira para a geração de energia tendo como combustível o bagaço de cana.
  - Quanto à umidade, é mais vantajoso queimar cavacos de madeira. A madeira, em um processo de secagem natural por um período de 90-120 dias, chega ao teor de umidade de 25-30%, enquanto, por questões operacionais e de logística, o bagaço de cana é queimado com 50-60% de umidade.
  - Um importante fator relacionado à produção de energia em termelétricas movidas a cavacos de madeira se refere à tecnologia de melhoramento aplicada para produção de madeira para carbonização. As características ideais para a produção de carvão são semelhantes às ideais para o uso em termelétricas.

2. Em relação à geração de energia elétrica a partir dos gases gerados na carbonização:

- É importante considerar a concentração das unidades de produção de carvão, estratégia que já vem sendo adotada por esta indústria pelos benefícios econômicos do fator escala de produção.
- A possibilidade do pequeno e médio produtor rural agregar valor à madeira cultivada pode ter como consequência ele deixar de ser um produtor de carvão, para ser um produtor de madeira com maior valor. Além dos ganhos econômicos, há os ganhos ambientais decorrentes da queima dos gases gerados na carbonização dispersos hoje nas inúmeras unidades de produção usadas pelos produtores independentes.
- Para a coleta e condução dos gases de carbonização para um ponto central de queima, estão sendo aplicadas técnicas semelhantes às obtidas no processo de recuperação de alcatrão em unidades de produção de carvão, práticas iniciadas nas décadas de 80 e 90.
- A queima desses gases, com foco principal na questão ambiental, já é realidade. Utiliza-se um forno simples de alvenaria onde são geradas temperaturas na ordem de 1200°C, mesma ordem de grandeza atingida nas caldeiras para termelétricas movidas a biomassa.
- A disponibilidade de água na região e de redes de transmissão para despacho da energia são questões importantes a serem consideradas na análise caso a caso. Para onde há limitação de água, há tecnologia desenvolvida para um uso menor no processo, porém com acréscimo do investimento. O maior volume de água é utilizado no processo de troca de calor relacionado ao funcionamento da caldeira. Quanto à rede de transmissão de energia, muitas vezes pode ser necessário considerar o custo de construção no custo do investimento em geração.

## 7 RECOMENDAÇÕES

1) Quanto à base de dados a ser usada nos próximos estudos relacionados a termelétricas:

- Considerar a cadeia de geração de energia, ou seja, desde a produção da madeira até a geração de energia, e em estudo de casos específicos, a transmissão até o cliente final.
- Considerar a escala de geração e a tecnologia para a geração de vapor em termelétricas. A eficiência de geração está diretamente relacionada aos maiores níveis de pressão e temperatura do vapor produzido nas caldeiras. Um exemplo são os dados das caldeiras utilizadas nesse estudo: a termelétrica com potência de 100MW foi prevista para produzir 3,69 toneladas de vapor por MWh gerado, a 97 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e 520 °C de temperatura; a caldeira para a geração de 15MWh foi dimensionada para produção de vapor a 67 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e 515°C de temperatura, sendo necessárias 3,91 toneladas de vapor por MWh gerado, ou seja, consumo de 5,96% a mais de vapor por MWh gerado. Visitamos uma termelétrica movida a gases de processo siderúrgico que gastava na ordem de 4,7 toneladas de vapor por MWh gerado.

2) Quanto aos próximos estudos relacionados à Teoria de Opções Reais:

- A utilização neste estudo do Movimento Browniano Geométrico (MGB) apresentou valores distorcidos em relação à realidade histórica da comercialização de energia elétrica no mercado SPOT. Outras modelagens devem ser consideradas, a exemplo dos modelos derivados dos procedimentos da reversão à média.
- Devemos ter sempre em mente que os resultados dos estudos podem ter importante influência na geração de emprego e renda, e conseqüentemente, melhoria do desenvolvimento humano, uma das maiores contribuições que os centros de pesquisas e as universidades podem proporcionar à nossa sociedade.
- A confiança dos empresários e investidores em investir em termelétricas movidas a cavacos de madeira pode aumentar à medida que eles perceberem os possíveis ganhos econômicos decorrentes de possíveis flexibilidades e de

incertezas. E neste contexto, a aplicação da Teoria de Opções Reais é fundamental. Entretanto, os estudos e os métodos de precificação destas oportunidades precisam ser melhorados. Os resultados obtidos precisam ser confiáveis aos olhos dos empresários e investidores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF, 2013. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012** / ABRAF. – Brasília: 2013. 148 p. : il. color; 21 cm.
- AMRAN, M.; KULATILAKA, N., **Real Options: Managing strategic investment in an uncertain world**. Boston: Harvard Business School Press, 1999.
- AMS, 2015, **Atlas Estatístico Associação Mineira de Silvicultura 2014 / 2015** (AMS). Disponível em: <http://silviminas.com.br/Secoes/numeros-do-setor/> Acesso em 10 de maio de 2016.
- ANEEL - b. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Relatório de vida útil**\_volume 1, Novembro de 2000, 363 p. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/012/documento/relatorio\\_vida\\_util\\_volume\\_1.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/012/documento/relatorio_vida_util_volume_1.pdf) Acesso em julho de 2016.
- ANEEL – c. 2014. **Metodologia e critérios gerais para definição do custo de capital a ser utilizado no cálculo da remuneração das instalações de geração de energia elétrica em regime de cotas**. Nota Técnica nº 89/2014-SRE/ANEEL. 2014. Disponível em [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/002/resultado/wacc\\_geracao\\_3\\_fechamento\\_ap\\_v5.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/002/resultado/wacc_geracao_3_fechamento_ap_v5.pdf) Acesso em julho de 2016.
- ANEEL- a. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Nota Técnica n. 005/2016-SGT/ANEEL \_DESPACHO nº 86, DE 14 DE JANEIRO DE 2016**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp2016086ti.pdf> Acesso em agosto de 2016.
- ANEEL, 2008. **Atlas de Energia Elétrica Brasileiro**, / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008. 236 p. : il Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf> Acesso em agosto de 2016.
- ANEEL, 2016 – d. **Matriz de energia elétrica por fonte**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse\\_fn2.cfm?origem=2&fonte=5&fase=3&combustivel=5](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse_fn2.cfm?origem=2&fonte=5&fase=3&combustivel=5) Acesso em 27 de agosto de 2016.

- ANEEL, 2016. **Capacidade de Geração do Brasil (BIG)**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em 10 outubro de 2016.
- ANTONIK, L.R. Análise de projetos de investimento sob condições de risco. **Revista FAE**, Curitiba, v.7, n.1, p.67-76, jan./jun. 2004 . Disponível em: [http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista\\_da\\_fae/fae\\_v7\\_n1/rev\\_fae\\_v7\\_n1\\_05\\_antonik.pdf](http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista_da_fae/fae_v7_n1/rev_fae_v7_n1_05_antonik.pdf). Acesso em janeiro de 2016.
- ANTONIK, L.R., ASSUNÇÃO, M. S. **Análise de Investimentos pelo Método de Opções Reais**. Disponível em: [http://fae.edu/publicacoes/pdf/iiseminario/gestao/gestao\\_04.pdf](http://fae.edu/publicacoes/pdf/iiseminario/gestao/gestao_04.pdf) Acesso em janeiro de 2015
- ANTONIK, L.R.; Análise de investimento sob condições de risco. **Revista FAE**, Curitiba, v.7, n.1, p.67-76, jan./jun. 2004. Disponível em: [http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista\\_da\\_fae/fae\\_v7\\_n1/rev\\_fae\\_v7\\_n1\\_05\\_antonik.pdf](http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista_da_fae/fae_v7_n1/rev_fae_v7_n1_05_antonik.pdf) Acesso em abril de 2016.
- APERAM, 2016. **Site institucional**, disponível em <http://aperambioenergia.com.br/> . Acesso em dezembro de 2016.
- ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor** / Alexandre Assaf Neto. – 5. Ed. – São Paulo : Atlas, 2010.
- ASSAF NETO, A.; LIMA, F.G. **Fundamentos de administração financeira** / Alexandre Assaf Neto / Fabiano Guasti Lima. – São Paulo : Atlas, 2010.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291
- BARAN, F. D. **Avaliação de uma Floresta de Eucaliptos na Presença de um Mercado de Certificados para Reduções de Emissões de Carbono: Uma Abordagem por Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2005. 112p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão. **Revista IPEF** n.20, p.101-113, jun.1980
- BASTIAN-PINTO, C. L. **Modelagem de opções reais com processos de reversão à média em tempo discreto: uma aplicação na indústria brasileira de etanol**. Tese (Doutorado em Administração), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 164 f. : il. (color.) ; 30cm. 2009.
- BASTIAN-PINTO, C. L.; BRANDÃO, L. E. T. Modelando Opções de Conversão com Movimento de Reversão à Média. **Revista Brasileira de Finanças**, v. 5, n. 2, p.p. 97-124, Dez , 2007.
- BASTIAN-PINTO, C. L.; BRANDÃO, L.E.T.; HAHN, W. J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. **Energy Economics**, V.31, I. 3, P.P. 335-510, 2009.
- BENEVITES, V.M.; TEIXEIRA, W.G.; REZENDE, M.E.; PIMENTA, A.S.; Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as Terras Pretas de Índio. In: TEIXEIRA, W.G.; KERN, D.C.; MADARI, B.E.; LIMA, H.N.; WOODS, W.I. (Ed.). **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 285-296. Disponível em: [www.Scielo.br/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000119&pid=S1807-86212013000300004&lng=pt](http://www.Scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000119&pid=S1807-86212013000300004&lng=pt) Acesso em janeiro de 2016.
- BENTES-GAMA, M.M.; SILVA, M. L.; VILCAHUAMARÁN, L. J. M. Análise econômica de sistemas agroflorestais na Amazônia Ocidental, machadinho d'oeste – RO. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.401-411, 2005. Disponível em [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622005000300007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000300007) Acesso em abril de 2016.
- BLACK, F.; SCHOLES M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. **Journal of Political Economy**, n. 81, p.p. 637 – 654, May-Jun, 1973.
- BNDES, 2016. **O Setor de Celulose e Papel**. Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro\\_setorial/setorial04.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro_setorial/setorial04.pdf) Acesso em fevereiro de 2016.

- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.
- BRANDÃO, L. E. T.; HAHN, W.J.; DYER, J.S. Using Binomial Decision Trees to solve Real Options Valuation Problems. **Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p.p. 69-88, June , 2005.
- BRASIL. **Opções reais: conceitos e aplicações a empresas e negócios** /Haroldo Guimarães Brasil... [et al]; Erico Ribeiro (org). -São Paulo: Saraiva, 2007
- BRITO, P. **Análise e viabilidade de projetos de investimentos** / Paulo Brito. – 2. Ed. – 3. reimpr. – São Paulo : Atlas : 2011.
- BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J; O. Análise do risco na avaliação de um projeto de investimento: uma aplicação do método de Monte Carlo. **Caderno de Pesquisas em Administração**, São Paulo, V. 1, nº 6, I trim/98. Disponível em: <http://bertolo.pro.br/MetodosQuantitativos/Simulacao/c6-Art7.pdf> Acesso em abril de 2016.
- BRUNI, A.L. **Avaliação de investimentos** / Adriano Leal Bruni – São Paulo : Atlas, 2008. – (Série finanças na prática)
- CALDEMA, 2015. **Site institucional**, disponível em [http://caldema.com.br/index\\_portugues\\_1024.html](http://caldema.com.br/index_portugues_1024.html). Acesso em 10 de agosto de 2016.
- CAPORAL, A.; BRANDÃO, L. E. T. Avaliação de uma unidade de geração de energia através da teoria de opções reais. **Brazilian Business Review**. Vol. 5, No.2 Vitória-ES, Mai – Ago 2008 p. 108-127
- CASTRO, A.L. **Avaliação de investimento de capital em projetos de geração termelétrica no setor elétrico brasileiro usando a teoria das opções reais**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Industrial. PUC. RJ.106 p. 2000.

- CASTRO, M.A.L., FIGUEIREDO, F.M., CAMARGO, I. M.T. Análise de Riscos de uma Distribuidora Associados à Compra de Venda de Energia no Novo Modelo do Setor Elétrico. **Revista Brasileira de Energia**. Vol. 10. N. 1. Disponível em: [https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://new.sbpe.org.br/wp-content/themes/sbpe/img/artigos\\_pdf/v10n01/v10n01a3.pdf&hl=pt\\_BR](https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://new.sbpe.org.br/wp-content/themes/sbpe/img/artigos_pdf/v10n01/v10n01a3.pdf&hl=pt_BR) . Acesso em abril de 2016.
- CCEE. CÂMARA DE COMÉRCIO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Preços de Liquidação de Diferença (PLD)**. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afLoop=610519289597071#%40%3F\\_afLoop%3D610519289597071%26\\_adf.ctrl-state%3D2qm1v9vek\\_240](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=610519289597071#%40%3F_afLoop%3D610519289597071%26_adf.ctrl-state%3D2qm1v9vek_240) Acesso em setembro de 2016.
- CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Carvão Vegetal : Aspectos Técnicos, Sociais, Ambientais e Econômicos**. Centro Nacional de Referência em Biomassa – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade São Paulo – IEE/USP. Dezembro de 2008. Disponível em: [http://143.107.4.241/download/documentos/notatecnica\\_x.pdf](http://143.107.4.241/download/documentos/notatecnica_x.pdf). Acesso em dezembro de 2016.
- CETEC. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Uso da madeira para fins energéticos**. – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais / CETEC. Belo Horizonte, 1980.
- CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Análise comparativa das diferentes tecnologias de carbonização e recuperação de subprodutos**. Subsídios 2014 ao Plano Siderurgia do MDIC: Modernização da Produção de Carvão Vegetal. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2014. Disponível em: [http://www.cgee.org.br/eventos/arquivos/CarvaoVegetal-CGEE\\_NT-Comparacoes\\_carbonizacao.pdf](http://www.cgee.org.br/eventos/arquivos/CarvaoVegetal-CGEE_NT-Comparacoes_carbonizacao.pdf). Acesso em janeiro de 2016.

- CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Ciência, Tecnologia e Inovação. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia** – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Carvao\\_Vegetal\\_WEB\\_02102\\_015\\_10225.PDF](https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102_015_10225.PDF). Acesso em janeiro de 2016.
- CHENG, Y., SHAWEN, Z. Core Modelo f the Forestry Invstiment rojet decision Support System Based on the Real Option. **Internacional Journal of Multimedia and Ublquitous Engineerling**. v. 11. n. 3, p. 291-310, 2016. Disponível em: <http://earticle.net/Article.aspx?sn=270879>. Acesso em janeiro de 2017.
- COELHO JÚNIOR, L. M., REZENDE, J.L.P., OLIVEIRA, A. D., COIMBRA, L.A. B.; SOUZA, A. N. Análise de investimento de um sistema agroflorestal sob situação de risco. **Revista Cerne**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 368-378, out./dez. 2008. Disponível em: <http://www.cerne.ufla.br/ojs/index.php/CERNE/article/view/649/548>. Acesso em abril de 2016.
- COPELAND, T; ANTIKAROV, V. **Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos** / Tom Copeland, Vladimir Antikarov. – Rio de Janeiro: Campus, 2001.
- CORATO, L.D., GAZHELI, A., LAGERKVIST, C-J. Investing in energy forestry under uncertainty. **Forest Policy and Economics**, V. 34, P. 56–64, 2013. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934113001184/1-s2.0-S1389934113001184-main.pdf?\\_tid=45424b5a-dce5-11e6-9fd9-00000aab0f6b&acdnt=1484678975\\_143e9be05878f474d3a81823e53fcee](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934113001184/1-s2.0-S1389934113001184-main.pdf?_tid=45424b5a-dce5-11e6-9fd9-00000aab0f6b&acdnt=1484678975_143e9be05878f474d3a81823e53fcee). Acesso em janeiro de 2016.
- COURTNEY , R.M., BRETT, A.B., CONNOR, J.D., MEYER, W.S., OSTENDORF, B., ZHU, Z., BAO, C. Real options analysis for land use management: Methods, application, and implications for policy. **Journal of Environmental Management**. V. 161 p. 144-152, 2015. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301479715301493/1-s2.0-S0301479715301493-main.pdf?\\_tid=7eff99ba-dce5-11e6-8134-](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301479715301493/1-s2.0-S0301479715301493-main.pdf?_tid=7eff99ba-dce5-11e6-8134-)

[00000aab0f6b&acdnat=1484679071\\_ec2ce29ac50b051aaa1d22a2ac8039a0](https://doi.org/10.1000a0000aab0f6b&acdnat=1484679071_ec2ce29ac50b051aaa1d22a2ac8039a0).

Acesso em janeiro de 2017.

COX, J. C.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: A simplified approach. **Journal of Financial Economics**, n. 7, p.p. 229–263, September, 1979.

CUNHA, M.R.F & FONTES, D.B.M.M. **A Real Options Approach to the Valuation of an Investment in Eucalyptus**. Faculdade de Economia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, and The School of Management Lancaster University. Lancaster, U.K. 2004. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/70683/2/16189.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.

De Smet EMPRAL. **Site institucional**. Disponível em: <http://www.dsempral.com.br/>. Acesso em janeiro de 2016.

DEZEN, F.J.P. **Opções reais aplicadas à escolha de alternativa tecnológica para o desenvolvimento de campos marítimos de Petróleo**. Campinas, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Disponível em <http://cepetro.unicamp.br/teses/mestrado/ano2001.htm#Francisco%20José%20Pinheiro%20Dezen> Acesso em 10/12/2015.

DIAS, A.C.A.M; BASTIAN-PINTO, C. L., BRANDÃO, L. E. T.; GOMES, L. L. Flexibility and uncertainty in agribusiness projects: investing in a cogeneration plant. **REV. ADM. MACKENZIE**, V. 12, N. 4 . SÃO PAULO, SP . JUL./AGO. 2011. p. 105-126

DIXIT, A., K.; PINDICK, R., S. **Investment under Uncertainty**. Princeton University Press, Princeton, 1994.

DUARTE JÚNIOR, A.M. **Risco: definições, tipos, medição e recomendações para seu gerenciamento**. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/23408022/955766319/name/RISCO.pdf>. Acesso em: maio 2016.

- DUKU-KAAKYIRE, A., NANANG, D.M. Application of real options theory to forestry investment analysis. **Forest Policy and Economics**, p. 6 539-552. 2004. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934103000030/1-s2.0-S1389934103000030-main.pdf?\\_tid=6c4fc4e4-dce4-11e6-8c0b-00000aab0f27&acdnat=1484678611\\_a6e579a130165f50bfda9dd31ca062e0](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934103000030/1-s2.0-S1389934103000030-main.pdf?_tid=6c4fc4e4-dce4-11e6-8c0b-00000aab0f27&acdnat=1484678611_a6e579a130165f50bfda9dd31ca062e0). Acesso em janeiro de 2017.
- EPE, 2013 - a. **Leilão de energia elétrica nova A-5 2013**. 29 de agosto de 2013. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20130829\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20130829_1.pdf) Acesso em 04/08/2015.
- EPE, 2013 - b. **Leilão de energia elétrica nova 2013**. 13 de dezembro de 2013. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20131213\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20131213_1.pdf) Acesso em 04/08/2015.
- EPE, 2015. **Leilão de Energia Elétrica nova A-5**. 30 de abril de 2015. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20A-5%202015/resumo\\_vendedor\\_21len\\_a5.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20A-5%202015/resumo_vendedor_21len_a5.pdf) Acesso em 04/08/2015.
- EPE, 2016 – a . **Leilão de Energia Elétrica nova A-5**. 29 de abril de 2016. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Resultado\\_completo\\_site\\_23\\_len.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Resultado_completo_site_23_len.pdf) Acesso em julho de 2016.
- EPE, 2016 – b. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**, ano base 2014. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Setembro de 2015. 232 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202015.pdf> Acesso em agosto de 2015.
- EPE, 2016 – c. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2011**, ano base 2010. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2011. 244 p. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20111213_1.pdf) Acesso em agosto de 2015.
- EPE. 2014. **Leilão de energia elétrica nova A-5**. 28 de novembro 2014. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/Resumo\\_Vendedor\\_20len\\_a5.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/Resumo_Vendedor_20len_a5.pdf) Acesso em 04/08/2015.

- FLORES, T. B. ***Eucalyptus no Brasil : zoneamento climático e guia para identificação*** – Piracicaba: IPEF, 2016. 448p.
- FONTOURA, C.F.V.T. ***Avaliação de projeto de investimento em usina termelétrica à capim-elefante : uma abordagem pela teoria de opções reais***. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 86 f. 2011.
- FREY, G. E., MERCER, D.E., CUBBAGE, F.W., ABT, R.C. A Real Options Method for Estimating the Adoption Potential of Forestry and Agroforestry Systems on Private Lands in the Lower Mississippi Alluvial Valley, USA. ***Agricultural Economics***, n° 44 p. 73–91. 2013. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ac5b/8c7f5a95a8e973ce387dab2dad3923cf6ce.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.
- GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I.R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. A. Estoques de Carbono no Solo e na Biomassa em Plantações de Eucalipto ***Revista Brasileira de Ciências do Solo***, 34:1069-1079, 2010
- GITMAN, L.J ***Princípios de Administração Financeira*** / Lawrence J. Gitman; tradução Allan Vidigal Hastings; revisão técnica Jean Jacques Salim. – 12. Ed. – São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.
- GOMES, LL. ***Avaliação de termelétricas no Brasil estudando o melhor momento de investimento por modelos de opções reais***. Tese de doutorado. PUC/RJ. 2002. 127 p.
- GOMES, S. I. ***Análise de viabilidade de cultivos florestais para fins de produção de energia elétrica***. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.
- GONÇALVES, D., NETO, J., BRASIL, H. ***The option of switching an investment project into an agribusiness project***. in annals: 10th International Conference on Real Options. New York, 2006.
- GRAHAM, J.R.; HARVEY,C.R. The theory and practice of corporae finance: evidence from the field. ***Journal of Financial Economics***, vol 60, 2001, pp. 187-243.

- GUIMARÃES, D.P.; SILVA, G.G.C.; SANS, L.M.A.; LEITE, F.P. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.15, n.2, p.192-197, 2007.
- HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos** : aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores / Henrique Hirschfeld. – 7. Ed. – 9. Reimpr. – São Paulo : Atlas, 2013.
- IBÁ, 2016. **Relatório Anual 2016 / Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ)**. – Brasília: 2016. 100 p. : il. color; 21 cm. Disponível em [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016\\_.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf) acesso em 20 de julho de 2016.
- IBAPE. Sociedade Brasileira de Perícias e Avaliações. **VI Simpósio da Sociedade Brasileira de Engenharia de Avaliações** – SOBREA. Novembro de 2014. Disponível em: [http://www.sobrea.org.br/eventos/docs/Anais\\_VI\\_Simposio/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20M%C3%A1quinas%20e%20Equipamentos%20-%20Os%C3%B3rio%20Gatto.pdf](http://www.sobrea.org.br/eventos/docs/Anais_VI_Simposio/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20de%20M%C3%A1quinas%20e%20Equipamentos%20-%20Os%C3%B3rio%20Gatto.pdf). Acesso em março de 2017.
- INSLEY, M. A Real Options Approach to the Valuation of a Forestry Investment. **Journal of Environmental Economics and Management**. n. 44, p. 471-492. Ontario, Canadá. 2002. Disponível em [http://econpapers.repec.org/article/eeejeeman/v\\_3a44\\_3ay\\_3a2002\\_3ai\\_3a3\\_3ap\\_3a471-492.htm](http://econpapers.repec.org/article/eeejeeman/v_3a44_3ay_3a2002_3ai_3a3_3ap_3a471-492.htm) Acesso em janeiro de 2016.
- INSLEY, M.C. & ROLLINS, K. **Real options in harvesting decisions on publicly owned forest lands (Revised)**, July 30, 2003. Disponível em: <https://uwaterloo.ca/economics/sites/ca.economics/files/uploads/files/Real%20options%20in%20harvesting%20decision%20on%20publicly%20owned%20forest%20lands.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.
- J.B. LUDWIG & CARDOSO, L. **Planejamento com Incertezas – o Desafio do Planejamento da Transmissão**. Artigo Publicado no XVII Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, 2003. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081216103345-GPL-18.pdf> Acesso em abril de 2016.

- JOAQUIM, M.S. **Aplicação da teoria das opções reais na análise de investimentos em sistemas agroflorestais** / Maísa Santos Joaquim. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia Florestal, Programa de Pós – Graduação em Ciências Florestais. 2012.
- JOAQUIM, M.S.; SOUZA, A. N.; SOUZA, S. N.; PEREIRA, R.S.; ANGELO, H. Aplicação da teoria das opções reais na análise de investimentos em sistemas agroflorestais. **Revista Cerne**. v. 21 n. 3. p. 439-447. 2015
- KERR, R. B.; MARTIN, D. M. L.; PERERA, H. K.; LIMA, F. G. Avaliação de um Investimento Florestal: uma Abordagem com Opções Reais Utilizando Diferenças Finitas Totalmente Implícitas e Algoritmo PSOR. **XXX Encontro da ANPAD**. São Paulo/SP. Setembro de 2009.
- KULATILAKA, N. The value of flexibility : the case of a dual-fuel industrial steam boiler. **Financial Manegement**. Autumn 1993. P. 271 – 280.
- LEITE, A. L. S.; CASTRO, N. J.; RIMPONI, R.R. Causas da volatilidade do preço *spot* de eletricidade no Brasil. **Ensaio FEE**, Porto Alegre, v. 34, n. 2, p. 647-668, dez. 2013 Disponível em: <http://revistas.fee.tche.br/index.php/ensaios/article/viewFile/2551/3182> acesso em abril de 2016.
- LIMA, G.A.C & SUSLICK, S.B. Quantificação do momento de investir em ativos minerais por meio da teoria das opções reais **Revista Escola de Minas** vol.54 , 149 – 154 . Ouro Preto Apr./June 2001
- MACHADO, C.C.; LOPES, E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Revista Cerne**, V.6, N.2, P.124-129, 2000
- MARINI, A.J. **O plantador de eucaliptos: a questão da preservação florestal no Brasil e o resgate documental de Edmundo Navarro de Andrade**. 2004. 320 f. Dissertação (Mestrada em História Social) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004. Disponível em <http://bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5439?show=full>. Acesso em 14 de maio de 2015.

- MARTINEZ-CESEÑA, E.A., MUTALE, J. Application of an advanced real options approach for renewable energy generation projects planning. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 15, p. 2087-2094. 2011. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1364032111000402/1-s2.0-S1364032111000402-main.pdf?\\_tid=493edcd8-dce4-11e6-8ff4-00000aab0f6c&acdnat=1484678552\\_a71000becf82b0c16da5479ca267f717](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1364032111000402/1-s2.0-S1364032111000402-main.pdf?_tid=493edcd8-dce4-11e6-8ff4-00000aab0f6c&acdnat=1484678552_a71000becf82b0c16da5479ca267f717). Acesso em janeiro de 2017.
- MINETTE, L. J.; MOREIRA, F. M. T.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C.C.; SILVA, K.R. Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2004
- MINETTE, L. J.; SILVA, E. N. FREITAS, K. E.; SOUZA, A. P.; SILVA, E. P. Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada em Niquelândia, Goiás **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.12, n.6, p.659–665, 2008
- MME. Ministério de Minas e Energia. **Perfil do Ferro Gusa**. Ministério de Minas e Energia. Documentos. Agosto de 2009. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P33\\_RT59\\_Perfil\\_do\\_Ferro-Gusa.pdf/ce33aa31-8e3b-4cd1-8723-87dc213f8c6b](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P33_RT59_Perfil_do_Ferro-Gusa.pdf/ce33aa31-8e3b-4cd1-8723-87dc213f8c6b). Acesso em março de 2015.
- MME/EPE, 2014. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2033** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014 2v.: il. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2033\\_ConsultaPublica.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2033_ConsultaPublica.pdf) Acesso em: 08 de agosto de 2015.
- MME/EPE, 2015 - a. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**, ano base 2014. Em planilha Excel. Disponível em <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx> Acesso em 12 de outubro de 2015

- MME/EPE, 2015 - b. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015. 2v.: il. Disponível em <http://www.epe.gov.br/PDEE/PDE%202024.pdf>. Acesso em 18 de junho de 2015.
- MOREIRA, F. M. T.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C.C.; MINETTI, L. J.; SILVA, K. R. Avaliação operacional e econômica do “feller-buncher” em dois subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.199-205, 2004
- MORGAN, D. G., S. BEN ABDALLAH, P. L. A real options approach to forest-management decision making to protect caribou under the threat of extinction. **Ecology and Society** 13(1): 27. 2007. Disponível em <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art27/> . Acesso em janeiro de 2016.
- MOTTA, R.R., CALÔBA, G.M. **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais** / Regis da Rocha Motta / Guilherme Marques Calôba. 1. Ed. – 9. Reimpr. – São Paulo: Atlas, 2013.
- MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005. Disponível em: <<http://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/muller.md.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- MUSSHOFF, O. Growing short rotation coppice on agricultural land in Germany: A Real Options Approach. **Biomass and Bioenergy**, v. 41, p. 73-85. 2012. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0961953412000736/1-s2.0-S0961953412000736-main.pdf? tid=2cfbd944-dce5-11e6-bfdd-00000aab0f6c&acdnat=1484678934\\_688eb60230e3ece7fd93fe7ee6bb7d72](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0961953412000736/1-s2.0-S0961953412000736-main.pdf? tid=2cfbd944-dce5-11e6-bfdd-00000aab0f6c&acdnat=1484678934_688eb60230e3ece7fd93fe7ee6bb7d72). Acesso em janeiro de 2017.
- NEPUMUCENO FILHO, F., SUSLICK, S.B. Alocação de recursos financeiros em projetos de risco na exploração de petróleo. **Revista de Administração de Empresas**, v. 40 , n. 1, p. 63-75. São Paulo. Jan./Mar. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rae/v40n1/v40n1a08.pdf>. Acesso em abril de 2016.

- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.319
- NICHI, M. H.; JACOVINE, A. G.; SILVA, M. L.; VALVERDE, R. V.; NOGUEIRA, H. P.; ALVARENGA, A. P. Influência dos Créditos de Carbono na Viabilidade Financeira de Três Projetos Florestais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.2, p.263-270, 2005
- OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M. T. A Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010
- PAULINO, E.J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto**. 50p. (Dissertação - Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.
- PAZ, L. **Mercados futuros: como vencer operando futuros** / Leandro Paz e Marcos Bastos; supervisão Maurício Bastter Hissa. – Rio de Janeiro : Elsevier, 2012. 23 cm.
- PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1-8, 2012.
- PORTAL BRASIL, **ÍNDICE GERAL DE PREÇOS DO MERCADO - IGP-M** (Fundação Getúlio Vargas - FGV). Disponível em <http://www.portalbrasil.net/igpm.htm>. Acesso em setembro de 2016.

- PRESLEY, K.W., BOQIANG, L. A real options valuation of Chinese wind energy technologies for power generation: do benefits from the feed-in tariffs outweigh costs? **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 1591-1599, 2016. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0959652615004588/1-s2.0-S0959652615004588-main.pdf?\\_tid=4b63516a-dc21-11e6-bd23-00000aab0f02&acdnat=1484594803\\_90df250b617a67a0a5949da214f343b1](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0959652615004588/1-s2.0-S0959652615004588-main.pdf?_tid=4b63516a-dc21-11e6-bd23-00000aab0f02&acdnat=1484594803_90df250b617a67a0a5949da214f343b1)  
Acesso em janeiro de 2017.
- PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, 2013b.
- PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, abr./jun. 2013
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C..S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p.100-106, abril 2005.
- QUÉNO, L.M.R; SOUZA, A. N.; ANGELO, H.; VALE, A.T.; MARTINS, I.S. Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia. **Revista Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 417-426, jul./set. 2011.
- REZENDE, J. L.; OLIVEIRA, A.D. **Análise Econômica e Social de Projetos Florestais**. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 385 p. 3 ed. 2013.
- ROSA, A.S. **Expectativas adaptativas, racionais ou razoáveis?**, in M. Branco, M.L.S. Carvalho, C. Rego (eds.), *Economia com Compromisso: Ensaio em Memória de José Dias Sena*, Évora: Universidade de Évora/CEFAG-UE, 293-303, 2006.  
Disponível em:  
[http://www.cefage.uevora.pt/pt/producao\\_cientifica/artigos/artigos\\_e\\_capitulos\\_e\\_m\\_livros/expectativas\\_adaptativas\\_racionais\\_ou\\_razoaveis](http://www.cefage.uevora.pt/pt/producao_cientifica/artigos/artigos_e_capitulos_e_m_livros/expectativas_adaptativas_racionais_ou_razoaveis) . Acesso em março de 2017.

- SALLES, A. C. N. **Metodologias de Análise de Risco para Avaliação Financeira de Projetos de Geração Eólica**. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. [Rio de Janeiro]. 2004, 83 p. 29,7 cm. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/acnsalles.pdf>. Acesso em abril de 2016.
- SAMANEZ, C. P. **Matemática financeira : aplicações à análise de investimentos** / Carlos Patricio Samanez. – 4. Ed. – São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2007.
- SAMPAIO, I. B. M. **Estatística aplicada à experimentação animal** / Ivan Barbosa Machado Sampaio. 3. Ed. Reimpressão. – Belo Horizonte: Fundação de estudo e pesquisa em medicina veterinária e zootécnica, 2010.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011
- SERATTO, C. D. **Viabilidade econômica de um projeto de produção de energia elétrica via biomassa florestal : estudo de caso a partir da Usina Santa Terezinha de Paranacity** . 238 f. (Dissertação - Mestrado em Economia). Universidade Estadual do Paraná, Maringá, 2010.
- SIMÕES, D.; FENNER, P.. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de madeira em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 40, n. 4, p. 711-720, out./dez. 2010
- SINAPI. **Metodologias e conceitos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção civil (SINAPI)** / Caixa Econômica Federal. – Brasília: CAIXA, 2015. 122 p. 21 cm.
- SOUZA, A.P.; SANTANA, R. C.; NOGUEIRA, G.S.; LEITE, A.M.P.; OLIVERIA, M. R.L.; HENRIQUES, P. H. Silvicultura e Produção de Biomassa de Eucalipto em Propriedades Rurais no Alto Jequitinhonha – MG. **Revista Biomassa & Energia**, v. 5, n. 1, p. 59-66, 2012.
- SOUZA NETO, J. A. **Opções Reais : introdução à teoria e à prática** / José Antônio de Souza Neto, Luiz Carlos Bergamini Junior, Virgília Izabel de Oliveira. – Rio de Janeiro : *Qualitymark*, 2008.

- VALE, A. B.; MACHADO, C.C.; MACHADO, J. M.; Eucaliptocultura no Brasil : silvicultura, manejo e ambiência / Editor Antônio Bartolomeu do Vale ... [et al]. – Viçosa, MG : SIF, 2014. 551p. : il ; 29cm.
- SZOLGAYOVA, J., FUSS, S., OBERSTEINER, M. Assessing the effects of CO2 price caps on electricity investments: A real options analysis. **Energy Policy**, n. 36 3974–3981. 2008. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301421508003479/1-s2.0-S0301421508003479-main.pdf?\\_tid=c8a5edc2-dce4-11e6-8616-00000aacb361&acdnat=1484678765\\_0ae96454ec145db5ca79fe1c9a1d3da7](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301421508003479/1-s2.0-S0301421508003479-main.pdf?_tid=c8a5edc2-dce4-11e6-8616-00000aacb361&acdnat=1484678765_0ae96454ec145db5ca79fe1c9a1d3da7). Acesso em janeiro de 2017.
- TATONI, W.M. **Avaliação de projetos de investimento em cogeração de energia utilizando bagaço de cana-de-açúcar em biorrefinarias a partir da teoria das opções reais** / Walter Milan Tatoni, Dissertação (MPAGRO) – Escola de Economia de São Paulo. 2012. 111f
- TEE, J. S. K. **Real Options Analysis of Carbon Forestry Under the New Zealand Emissions Trading Scheme** (Thesis, Master of Philosophy (MPhil)). University of Waikato, Hamilton, New Zealand. 2011. Disponível em: <http://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/5815>. Acesso em janeiro de 2016.
- TRIGEORGIS, L, Real Options and Interactions with Financial Flexibility, **Financial Management**, p. 202-224, Autumn 1993.
- WANG, X.; CAI, Y.; DAI, C. Evaluating China's biomass power production investment based on a policy benefit real options model. **Energy**, n. 73, 751-761. 2014. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0360544214007798/1-s2.0-S0360544214007798-main.pdf?\\_tid=0fb19ff4-dce5-11e6-9bce-00000aab0f26&acdnat=1484678885\\_029f6d1dcf2c3e29c7e94029af279fdc](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0360544214007798/1-s2.0-S0360544214007798-main.pdf?_tid=0fb19ff4-dce5-11e6-9bce-00000aab0f26&acdnat=1484678885_029f6d1dcf2c3e29c7e94029af279fdc). Acesso em janeiro de 2017.

- XIAN, H., COLSON, G., MEI, B., WETZSTEIN, M.E. Co-firing coal with wood pellets for U.S. electricity generation: A real options analysis. **Energy Policy**, n. 81, p. 06–116, 2015. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301421515000993/1-s2.0-S0301421515000993-main.pdf?\\_tid=b5f17d1a-dc1f-11e6-ac92-00000aacb360&acdnat=1484594123\\_a8bdfc7093ce373f1c00ab121c282475](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S0301421515000993/1-s2.0-S0301421515000993-main.pdf?_tid=b5f17d1a-dc1f-11e6-ac92-00000aacb360&acdnat=1484594123_a8bdfc7093ce373f1c00ab121c282475)  
Acesso em janeiro de 2017.
- YEMSHANOV , D., MCCARNEY , G. R., HAUER, G., LUCKERT, M.K., UNTERSCHULTZ, J., MCKENNEY , D.W. A real options-net present value approach to assessing land use change: A case study of afforestation in Canada. **Forest Policy and Economics**, V. 50, p. 327-336. January 2015. Disponível em: [http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934114001749/1-s2.0-S1389934114001749-main.pdf?\\_tid=e67839c2-dc21-11e6-8e4c-00000aab0f26&acdnat=1484595064\\_ca31553bb738b1718761cc907e29dab9](http://ac-els-cdn-com.ez36.periodicos.capes.gov.br/S1389934114001749/1-s2.0-S1389934114001749-main.pdf?_tid=e67839c2-dc21-11e6-8e4c-00000aab0f26&acdnat=1484595064_ca31553bb738b1718761cc907e29dab9).  
Acesso em janeiro 2017.
- ZHANG , M.; ZHOU, D.; DING, H.; JIN, J. Biomass Power Generation Investment in China: A Real Options Evaluation. **Sustainability**, n.,8, p. 563. 2016. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/6/563/htm>. Acesso em janeiro de 2017.