

GABRIEL BROWNE DE DEUS RIBEIRO

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA  
TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA FLORESTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R484a  
2018  
Ribeiro, Gabriel Browne de Deus, 1987-  
Análise técnica e econômica da produção de energia  
termelétrica a partir da biomassa florestal / Gabriel Browne de  
Deus Ribeiro. – Viçosa, MG, 2018.  
xiii,106f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Sebastião Renato Valverde.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.95-101.

1. Florestas. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Biomassa florestal. 4. Política florestal. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

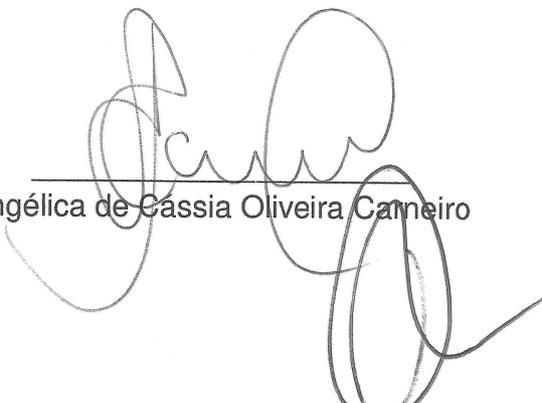
CDD 22 ed. 634.988

GABRIEL BROWNE DE DEUS RIBEIRO

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA  
TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA FLORESTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 02 de março de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
Angélica de Cassia Oliveira Carneiro

  
\_\_\_\_\_  
Fabio Rodrigo Siqueira Batista

\_\_\_\_\_  
Sebastião Renato Valverde  
(orientador)

*À minha esposa, meu filho, minha Nina e à minha família, que sempre me apoiaram e incentivaram em todos os momentos.*

*Dedico...*

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Francine, minha companheira e meu eterno amor. Ao meu filho Pedro, que chegou ao mundo durante o mestrado para encher nossas vidas de alegria e amor. E à Nina, nossa companheira e primeira filha. Vocês sempre me apoiaram e foram fonte inesgotável de inspiração, amparo e amor. Sem vocês nada disso existiria. Sem vocês eu não teria chegado até aqui. Amo vocês do fundo do meu coração.

Aos meus pais Geraldo e Maria Alba, por tudo que fizeram e fazem por mim, pela nossa família, por me apoiarem incessantemente nesse novo rumo em Viçosa, e amor inesgotável.

À minha irmã Narayana e minha sobrinha Amanda, exemplos de vida, de amor e carinho, que me acompanham sempre.

Aos meus avós João, Alba, Lúcia e Geraldo, meus eternos exemplos. Sempre inspirações. Aos meus tios de Viçosa, de São João Del Rey, de Campo Grande, MS. Todos participaram e ajudaram de alguma forma. À família da minha esposa, sempre amigos e fontes de apoio.

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação no mestrado e pela oportunidade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao professor Valverde, sou eternamente grato pela orientação deste trabalho, pelo suporte e pelas longas e infundáveis conversas ao longo dessa caminhada. Certeza que nosso trabalho continua.

À professora Cassinha, pelos ensinamentos ao longo do mestrado e por ter aceitado ser parte da banca examinadora.

À equipe do CEPEL, que ajudou bastante nas discussões e análises desse projeto, e em especial ao Professor Fabio Batista, que aceitou o convite para participar da banca examinadora; à equipe da EPE; e ao pessoal da ICAVI, que também contribuíram para o trabalho.

Ao professor Eduardo Borges, que aceitou ser meu orientador no início deste trabalho.

Aos funcionários do DEF, em especial a Jussara, a Marquione, o Alexandre e o Dílson, pelo auxílio prestado com muita dedicação.

Aos amigos de Viçosa, dos mais antigos, dos que voltei a conviver nas resenhas do Dom Porco, que me apoiaram em todos os momentos.

Aos amigos do tênis!

Aos amigos do Rio, aos ex-colegas de trabalho. Todos me apoiaram na mudança e foram importantes para esse trabalho ocorrer.

Aos demais amigos do mestrado que me apoiaram, me ensinaram e ajudaram em diversas discussões do setor florestal.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

Meu muito OBRIGADO!!!

## **BIOGRAFIA**

Gabriel Browne de Deus Ribeiro, filho de Geraldo Browne Ribeiro Filho e Maria Alba Pereira de Deus, nasceu em 23 de agosto de 1987, natural de Viçosa, Minas Gerais.

Graduou-se em Ciências Econômicas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, em agosto de 2011. Desde 2008, tem atuado em projetos, consultorias e empresas com foco nas áreas de energia e meio ambiente.

Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa em março de 2016, vindo a obter o título de mestre em 02 de março de 2018.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xii
1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	6
2.1. Geral .....	6
2.2. Específicos.....	6
3. Revisão de Literatura .....	7
3.1. Aspectos de mercado e regulatórios do setor de energia no Brasil 7	
3.2. Participação da biomassa florestal no setor elétrico .....	18
3.3. Características da biomassa florestal como fonte de energia.....	31
3.4. Características do cavaco de <i>Eucalyptus sp.</i> no emprego em usinas termelétricas .....	35
3.5. Tecnologias de conversão com base na biomassa florestal .....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1. Pesquisa bibliográfica .....	44
4.2. Análise técnica – dimensionamento da UTE.....	44
4.3. Identificação da área de plantios florestais na microrregião de Viçosa (MG) .....	45
4.4. Premissas para o desenvolvimento do projeto típico de geração termelétrica.....	49
4.5. Estimativa de energia termelétrica gerada .....	50
4.6. Potencial de geração de empregos.....	56
4.7. Análise da viabilidade econômica da UTE em diferentes cenários de contratação de energia.....	57

5.	Resultados e discussão.....	68
5.1.	Dimensionamento do projeto da usina termelétrica .....	68
5.2.	Simulações de variação nos parâmetros florestais .....	71
5.3.	Potencial para geração de empregos.....	73
5.4.	Análise econômica – estudo de caso .....	75
5.4.1.	Energia integralmente contratada no mercado regulado (ACR) 76	
5.4.2.	Energia integralmente contratada no mercado livre (ACL) .....	80
5.4.3.	Energia parcialmente contratada nos dois mercados (ACR e ACL) 85	
5.4.4.	Comparação entre os casos .....	87
5.5.	Diagnóstico e recomendações .....	88
6.	Conclusões.....	93
7.	Bibliografia.....	95
8.	Anexos .....	102
8.1.	Relação das Usinas Termelétricas a Resíduos Florestais em operação: .....	102
8.2.	Usinas Termelétricas a cavaco do Ambiente de Contratação Regulada.....	104
8.3.	Estatísticas dos casos em que a usina está parcialmente contratada nos dois mercados .....	105
8.4.	Dados técnicos dos projetos termelétricos.....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes utilizadas para geração elétrica no Brasil, em fevereiro de 2018.....	19
Tabela 2: Localização e potência das usinas termelétricas a biomassa florestal no país.....	23
Tabela 3: Perfil industrial das termelétricas a biomassa florestal e destinação da energia elétrica gerada. ....	25
Tabela 4: Usinas termelétricas a cavaco de madeira que venceram nos leilões de energia do governo. ....	27
Tabela 5: Dados econômicos das termelétricas a biomassa florestal do ambiente regulado (em construção e em operação).....	29
Tabela 6: PCU e consumo de cavaco em razão da variação na umidade .....	37
Tabela 7: Cenários de levantamento de oferta de eucalipto na região de Viçosa (MG).....	48
Tabela 8: Premissas técnicas e florestais.....	56
Tabela 9: Estimativas de densidade básica, massa seca e energia.....	68
Tabela 10: Resultados do dimensionamento técnico.....	70
Tabela 11: Resultados das simulações de variações no teor de umidade .....	72
Tabela 12: Potencial de geração de empregos em cada projeto.....	74
Tabela 13: Principais parâmetros do projeto .....	76
Tabela 14: Análise de sensibilidade com relação ao nível de inflexibilidade da UTE.....	78
Tabela 15: Sensibilidade para o Preço de Energia no ACL.....	80
Tabela 16: Sensibilidade para o preço do combustível.....	81
Tabela 17: Resultados da análise de sensibilidade quanto a diferentes percentuais de participação nos mercados de energia.....	86
Tabela 18: Resumo dos resultados econômicos encontrados.....	87
Tabela 19: Principais estatísticas estimadas de cada caso. ....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de participação de uma Usina Termelétrica no setor elétrico brasileiro. Fonte: Elaboração própria. ....	14
Figura 2: Integração eletroenergética do sistema elétrico brasileiro em 2015 (EPE, 2016a). ....	15
Figura 3: Dilema do Operador relacionado ao acoplamento temporal das decisões. Fonte: Adaptado de EPE (2016a) e BATISTA et al. (2017). ....	17
Figura 4: Especificações dos tamanhos de cavacos de madeira.....	36
Figura 5: Esquema simples de uma Usina Termelétrica a cavaco de madeira.....	40
Figura 6: Esquema metodológico da análise técnica.....	45
Figura 7: Raio traçado de 50 km do centro de Viçosa (MG). ....	48
Figura 8: Esquema metodológico da análise econômica.....	58

## RESUMO

RIBEIRO, Gabriel Browne de Deus, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2018. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal.** Orientador: Sebastião Renato Valverde.

O objetivo deste trabalho foi realizar análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica utilizando como fonte a biomassa florestal, em forma de cavaco de eucalipto, com a finalidade de avaliar o potencial para expansão do uso da biomassa florestal na matriz elétrica brasileira. Realizou-se uma busca na literatura para determinar: os principais aspectos do mercado de energia elétrica no país; a participação da biomassa florestal nesse mercado; as principais características energéticas dessa fonte, e as tecnologias de conversão em energia termelétrica. Posteriormente, foi desenvolvida análise técnica para dimensionar a implantação de uma usina termelétrica (UTE) a cavaco de eucalipto na microrregião de Viçosa, MG, avaliando capacidades de 5, 10 e 20 megawatts (MW) de potência bruta instalada. Também foi realizada análise econômica de um projeto termelétrico típico de 10 MW, com base nas seguintes hipóteses de venda de energia: comercialização integral no mercado regulado (ACR), comercialização integral no mercado livre (ACL) e comercialização parcial no mercado regulado e mercado livre (ACR e ACL). Cada potência apresentou capacidade para demandar 8,7% (5 MW), 13,2% (10 MW) e 25,1% (20 MW) da área estimada de plantios de eucalipto dessa região. No mercado regulado, onde o risco para o empreendedor é zero, a Taxa Interna de Retorno (TIR) foi de 15,0% ao ano, e verificou-se que quanto maior o nível de inflexibilidade adotado pela UTE, maior a Receita Fixa anual requerida pelo investidor e maior o Índice Custo Benefício (ICB). Mesmo assim, os ICBs estimados para o empreendimento permaneceram dentro da média dos últimos vencedores dos leilões de energia nova. No mercado livre, onde o risco do investidor é maior, o retorno médio aumentou levando em consideração as condições atuais de mercado, com Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 7,7 milhões e TIR de 20,4% ao ano. E a comercialização parcial nos dois

mercados levou a resultados econômicos satisfatórios e a melhoria na mitigação dos riscos se comparado ao mercado livre. Portanto, a decisão da alternativa de mercado a ser escolhida dependerá do apetite ao risco do investidor. Por fim, este trabalho recomenda que para que haja o crescimento da participação da biomassa florestal no mercado de energia elétrica, deve-se adequar os critérios dos leilões de energia para a biomassa florestal, por parte do governo, bem como da maior qualidade e integração dos projetos, por parte dos investidores e produtores florestais.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Gabriel Browne de Deus, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2018. **Technical and economic analysis of thermoelectric energy production from forest biomass.** Advisor: Sebastião Renato Valverde.

The objective of this work was to carry out technical and economic analysis of thermoelectric energy production using forest biomass, as a eucalyptus woodchip, in order to evaluate the potential for forest biomass expansion in the Brazilian electric mix. Literature search was conducted to determine: the main aspects of the electricity market in the country; forest biomass participation in this market; the main energy characteristics of this source and conversion technologies in thermoelectric energy. Subsequently, technical analysis was performed to evaluate the implementation of a eucalyptus woodchip thermoelectric power plant (UTE) in Viçosa micro-region, MG state, evaluating capacities of 5, 10 and 20 megawatts (MW) of installed gross power. Economic analysis of a typical 10 MW thermoelectric project was developed, based on the following hypotheses of energy sales: full commercialization in the regulated market (ACR), full commercialization in the free market (ACL) and partial commercialization in regulated and free markets (ACR and ACL). Each power presented the capacity to demand 8.7% (5 MW), 13.2% (10 MW) and 25.1% (20 MW) of the eucalyptus plantations estimated area of this region. In the regulated market, whereas the investor risk is zero, the Internal Rate of Return (IRR) was 15.0% per year, and the bigger the inflexibility level adopted by the UTE, the higher the annual Fixed Income required by the investor and the higher the Cost Benefic Index (ICB). Even so, the estimated ICBs remained within the average of the last winners of the new energy auctions. In the free market, whereas the investor risk is bigger, average return increased taking into account the current market conditions, with Net Present Value (VPL) of R\$ 7.7 million and IRR of 20.4% per year. And partial commercialization in both markets led to satisfactory economic results and improved risk mitigation compared to the free market. Therefore, the market alternative to be chosen will depend on

the investor's risk appetite. Finally, this work recommends that the energy auctions criteria for forest biomass should be adjusted by the government, as well as the higher quality and integration of the projects should be observed by investors and forest producers, in order to growth the forest biomass participation in the electricity market.

## 1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica utilizando como fonte a biomassa florestal, em forma de cavaco de eucalipto, com a finalidade de avaliar o potencial para expansão do uso da biomassa florestal na matriz elétrica brasileira.

O Brasil dispõe atualmente de uma matriz de produção elétrica de origem predominantemente renovável, onde a fonte hídrica se destaca com participação de 64,8% da oferta interna, as fontes de biomassa com 8,8%, eólica 7,5%, solar 0,6% e as fontes não renováveis com 18,3%, conforme dados de fevereiro de 2018 (ANEEL, 2018)<sup>1</sup>.

Devido à sua grande capacidade hidráulica, o sistema gerador brasileiro foi constituído com forte predominância de usinas hidrelétricas e com a utilização da geração térmica em complementação à fonte hídrica, sendo denominado um sistema hidrotérmico (EPE, 2016a).

Nesse sentido, as termelétricas foram estabelecidas como um recurso complementar para o sistema, principalmente em momentos de hidrologia desfavorável. A decisão sobre o seu despacho elétrico é tomada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que busca atender a carga prevista para o sistema ao menor custo, isto é, minimizando a geração térmica e evitando vertimentos nos reservatórios das usinas. Nesse modelo, o despacho das térmicas pode se dar basicamente: i) dentro da ordem de mérito de custo, ou seja, da usina de menor Custo Variável Unitário (CVU) até a de maior custo, limitadas ao Custo Marginal de Operação do sistema (CMO); ou ii) fora da ordem de mérito, por decisão do governo em momentos de condições hidrológicas deterioradas.

No entanto, com a crise energética que o Brasil tem enfrentado nos últimos anos, o acionamento das termelétricas movidas a combustíveis fósseis se tornou frequente, em razão principalmente: do aumento da

---

<sup>1</sup> Dados obtidos do Banco de Informações de Geração – BIG (ANEEL), com mais de 4.900 usinas em operação, capacidade total de geração de energia elétrica de mais de 166,2 gigawatts (GW), representando 100% da oferta interna de energia elétrica até 02 de fevereiro de 2018 (ANEEL, 2018).

demanda por energia no país, que registrou taxas de crescimento a um ritmo de 5% ao ano no período 2007-2014; da situação hidrológica deteriorada, com o baixo índice de chuvas nas regiões onde se encontram os principais reservatórios de regularização do Sistema Interligado Nacional (SIN); e das crescentes restrições à construção de novas hidrelétricas com grandes reservatórios de regularização (LAMAS; GIACAGLIA, 2013; LOSEKANN, 2014; POTTMAIER et al., 2013).

Houve também significativo impacto da Medida Provisória 579 (MP 579), de setembro de 2012, sobre a demanda de energia, dado que a medida reduziu, em média, 20% da tarifa de energia, gerando aumento do consumo coincidentemente no momento em que a realização de baixas afluições aos reservatórios começava a ser observada.

Como resultado, pode-se observar que: as usinas termelétricas começaram a atuar de maneira quase contínua e fora da ordem de mérito; muitas delas com elevado custo de operação e movidas a combustíveis fósseis; e o aumento do custo de operação do sistema provocado pelas baixas afluições levou a elevação do preço de energia no mercado de curto prazo, denominado PLD (Preço de Liquidação de Diferenças).

Atrelado a isso, a diminuição da capacidade de regularização do sistema em razão das crescentes restrições à construção de novas e grandes hidrelétricas com reservatórios de regularização, além da expansão significativa de fontes consideradas não controláveis, como a eólica e solar fotovoltaica, trouxeram maior complexidade ao sistema elétrico e um grande desafio à operação sistema. Assim, o cenário atual de demanda por energia elétrica aponta para a necessidade que se busquem fontes de energia renováveis, viáveis economicamente para o sistema, e que atuem tanto de forma contínua como também quando forem demandadas.

Dessa forma, tendo em vista que o país é um grande produtor de florestas plantadas, principalmente dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, o uso dessa biomassa ligno-celulósica como insumo energético tem sido considerado por estudiosos e órgãos governamentais como uma das

principais fontes renováveis a atender o crescimento demanda energética brasileira nas próximas décadas (EPE, 2016d; PAYN et al., 2015).

No cenário energético industrial, observa-se que atualmente diversos empreendimentos têm optado pelo uso de cavaco de madeira e de resíduos florestais para a geração de energia térmica (vapor) em detrimento da energia gerada por combustíveis fósseis, se atentando aos benefícios econômicos, sociais e ambientais dessa mudança (MIRANDA et al., 2017; NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010).

Em que pese as vantagens da biomassa florestal em relação ao combustível fóssil na geração térmica, para a geração elétrica, o uso dessa fonte de energia enfrenta muitas barreiras e a falta de uma política compatível, sendo considerada ainda bastante incipiente, como apontam os dados a seguir.

Existem atualmente no país pouco mais de 4.900 usinas termelétricas em operação, sendo que destas 95 possuem como fonte de energia a biomassa florestal, o que representa apenas 1,90% da capacidade elétrica total instalada. Das 95 usinas que utilizam como fonte de energia a biomassa florestal, 55 utilizam o cavaco de madeira, o que representa apenas 0,26% da oferta total. Nessa análise, o estado de Minas Gerais, que é o maior produtor florestal do país, possui apenas quatro usinas de resíduos florestais em operação – Usinas Fazenda Santa Marta (Grão Mogol), Natureza Limpa (Unaí), Cargill Uberlândia (Uberlândia) e Rações Patense (Itaúna), o que traz à tona o reduzido uso da biomassa florestal para produção elétrica no país e, particularmente, no estado mineiro (ANEEL, 2018).

No ambiente regulado, onde empreendimentos elétricos participam de leilões de energia visando contratos de longo prazo e a viabilização de um fluxo estável de receitas através da remuneração fixa dos contratos, apenas doze empreendimentos termelétricos de biomassa florestal estão contratados para geração elétrica após vencerem em seus respectivos leilões. O que é considerado pouco se comparado a um cenário com mais de 1.200 empreendimentos vencedores desde o início dos leilões, em 2003 (CCEE, 2018).

Das 221 usinas em construção no país, quatro terão como fonte a biomassa florestal, o que representa 0,7% da potência outorgada total em construção. Dos 381 empreendimentos já outorgados, mas cujas construções ainda não foram iniciadas, seis usinas serão movidas a biomassa florestal, o que representa 6,6% da potência outorgada. Esses dados apontam para um cenário de baixa participação da biomassa florestal no longo prazo.

Portanto, tendo em vista o problema apresentado, esta pesquisa teve como objetivo principal realizar uma análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal, com a finalidade de avaliar o potencial para expansão do uso da biomassa florestal na matriz elétrica brasileira.

### **Relevância do Estudo**

Este trabalho é relevante na medida em que busca contribuir para promover avanços teóricos e técnicos no campo da Ciência Florestal e, mais especificamente, nos campos da economia florestal e economia da energia; busca discutir sobre a maior participação da biomassa florestal como mais uma fonte de energia renovável para o aumento da oferta de energia no país; discutir sobre o aproveitamento econômico para geração de energia do maciço florestal já existente na microrregião de Viçosa, que se encontra subutilizado; discutir sobre as vantagens do uso do cavaco de eucalipto na geração de energia; discutir sobre a possibilidade de desenvolvimento econômico da microrregião de Viçosa com a geração de emprego e renda, através do aproveitamento energético da biomassa florestal existente e do estímulo ao incremento de novos plantios florestais; discutir o uso da biomassa florestal como fonte ecologicamente mais sustentável do que as energias de fontes fósseis.

O incentivo à utilização de um combustível renovável como a biomassa florestal na matriz elétrica brasileira pode servir para estimular uma gama de segmentos econômicos, financeiros, sociais e ambientais:

- Do ponto de vista econômico, o incentivo à extensa cadeia produtiva florestal pode levar a maior arrecadação de impostos (nas esferas municipais e estaduais, inclusive), melhoria no PIB municipal e

atração de segmentos de alta tecnologia, seja para o setor energético quanto para a silvicultura, colheita, etc.

- Do ponto de vista financeiro, novas linhas de financiamento podem ser estimuladas para se adequar aos projetos florestais para energia, que dependem de um maior prazo de maturação em razão dos ciclos de corte mais longos dos plantios (se comparados às *commodities* agrícolas), das questões temporais de plantios, etc.

- Do ponto de vista social, projetos de pequeno a médio porte como os analisados neste trabalho têm elevado potencial de geração de emprego no campo e na indústria. Além do mais, o maior investimento no campo pode reduzir o êxodo rural e incentivar famílias a continuarem no campo, o que é importante para não se gerar grande concentração de terras sob a posse de poucos produtores.

- Do ponto de vista ambiental, o incentivo ao uso de um combustível renovável traz consigo o endereçamento das metas para redução das emissões de carbono, podendo inclusive estimular o aumento de projetos de reflorestamento no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma vez que projetos de usinas termelétricas a biomassa florestal podem reduzir emissões de gases do efeito estufa, produzindo benefícios reais e mensuráveis relacionados à mitigação das mudanças climáticas.

Este trabalho justifica-se também pela carência de estudos e pesquisas sobre a utilização da biomassa florestal como fonte de energia elétrica; necessidade de estudos que busquem dar uma destinação economicamente viável às florestas plantadas subutilizadas na região de Viçosa; necessidade de estudos que trabalhem com as alternativas de mercado do setor elétrico, com simulações e análises de sensibilidade para avaliar a atratividade de cada projeto dentro dos ambientes livre e regulado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal, com a finalidade de avaliar o potencial para expansão do uso da biomassa florestal na matriz elétrica brasileira.

### **2.2. Específicos**

Os objetivos específicos foram:

- Identificar os principais fatores que compõem o uso da biomassa florestal como fonte de energia termelétrica no Brasil;
- Desenvolver uma análise técnica para dimensionar uma usina termelétrica a cavaco de eucalipto (projeto típico) na microrregião de Viçosa, MG, simulando cenários de geração e demanda de madeira;
- Desenvolver um estudo de viabilidade econômica avaliando o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), entre outros indicadores, do projeto típico da usina, sob diferentes hipóteses de venda da energia;
- Analisar as perspectivas do setor de energia de biomassa florestal no país e desenvolver um conjunto de recomendações e medidas necessárias para os principais agentes envolvidos no setor.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Aspectos de mercado e regulatórios do setor de energia no Brasil**

A indústria elétrica brasileira se desenvolveu de forma mais acentuada durante o período de 1945 a 1975, com a aceleração da construção do parque gerador através da consolidação da opção pela geração hidrelétrica. Foi desenvolvido um parque gerador com reservatórios dotados de grande capacidade de acumulação de água e de regularização, e interligação plena entre as regiões com um sistema de linhas de transmissão de longa distância (EPE, 2016a; PINTO JR. et al., 2007).

O desenvolvimento do setor elétrico brasileiro foi estimulado a partir da exploração de seu potencial hidráulico, com recursos abundantes e diversidade hidrológica existente entre as bacias e regiões, em contraste com a opção predominantemente térmica (a carvão) que marcou a evolução da indústria elétrica na grande maioria dos outros países (PINTO JR. et al., 2007).

De meados do século passado até a década de 1990, o setor elétrico nacional foi planejado e operado por empresas estatais, onde os estados da federação detinham as concessões locais, gerindo a distribuição de energia, e com investimentos nos segmentos de geração e transmissão, e a Eletrobras e suas empresas controladas eram detentoras de maior parte dos ativos nacionais de geração e transmissão. Dados de 1993 apresentados em um estudo de Esposito (2012) demonstram que a Eletrobras era detentora de 49% dos ativos do setor elétrico, e os estados da federação eram proprietários de 33% dos ativos (ESPOSITO, 2012).

Nos anos 1980, o setor elétrico experimentou uma forte crise financeira atrelada também ao momento econômico do país. Nesse período, segundo Pinto Jr. et al. (2007), diversas reformas foram estabelecidas no setor, sendo muitas delas, na visão dos autores, com graves erros de concepção ou implantação, o que foi preponderante para

que se chegasse à crise do racionamento de energia em 2001, levando a uma nova fase de reformas em 2003.

Esse novo modelo foi implementado por meio da aprovação, no Congresso Nacional, das Leis nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Seu principal objetivo era garantir a segurança do abastecimento, buscando evitar os riscos de racionamento de energia, e também a promoção da modicidade tarifária por meio da contratação eficiente de energia para os consumidores regulados (EPE, 2016d; ESPOSITO, 2012).

Ao longo de seu desenvolvimento, portanto, o setor elétrico nacional passou por diversas mudanças, sendo que atualmente sua estrutura é baseada na atuação de cinco principais instituições setoriais:

- **ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica:** responsável pela fiscalização, mediação e regulação econômica do setor elétrico, promovendo as licitações para a exploração de serviços públicos de energia elétrica.

- **ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico:** responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional – SIN. Fica sob fiscalização da ANEEL.

- **EPE – Empresa de Pesquisa Energética:** responsável por subsidiar o planejamento do setor energético através de estudos e pesquisas.

- **CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica:** responsável por viabilizar a comercialização de energia elétrica no SIN por meio da promoção de leilões de compra e venda de energia. Realiza a liquidação financeira das diferenças entre os montantes contratados e o que foi efetivamente consumido.

- **CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico:** responsável por avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica.

Em adição, ficou estabelecido que o Ministério de Minas e Energia (MME) ficaria responsável pelo exercício do Poder Concedente, e o

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), seria o órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas e diretrizes energéticas, sendo presidido pelo Ministro do MME (CCEE, 2018a; EPE, 2016d).

De forma sucinta, o Quadro 1 apresenta as principais características do setor nos diferentes modelos implantados ao longo do tempo.

Quadro 1: Características dos modelos do setor elétrico brasileiro

<b>Características</b>	<b>Modelo Antigo (até 1995)</b>	<b>Modelo de Livre Mercado (1995 – 2003)</b>	<b>Novo Modelo (2004 até hoje)</b>
<b>Tipo de competição</b>	Monopólios – sem competição	Competição na geração e comercialização	Competição na geração e comercialização
<b>Mercado</b>	Regulado	Livre	Convivência entre mercados Livre e Regulado (ACL e ACR)
<b>Financiamento</b>	Recursos públicos	Recursos públicos e privados	Recursos públicos e privados
<b>Empresas</b>	Verticalizadas e predominância de Estatais	Divididas por atividade	Divididas por atividade
<b>Consumidores</b>	Cativos	Livres e cativos	Livres e cativos
<b>Tarifas</b>	Reguladas em todos os segmentos	Preços livremente negociados na geração e comercialização	Determinada em cada ambiente (ACL e ACR)

Fonte: Adaptado de CCEE (2018b).

Assim, com a regulamentação que deu base ao novo modelo regulatório do setor, a comercialização de energia por geradores elétricos passou a ser feita por duas modalidades: o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), onde todas as operações dos dois ambientes são registradas na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Com isso, as empresas geradoras passaram a comercializar energia tanto no ACL quanto no ACR.

No ACL, os contratos são negociados livremente e os preços, volumes e prazos são determinados pelas partes – comprador e vendedor. Normalmente, os contratos no ACL variam de um a, no máximo, cinco anos, embutindo-os um caráter de curto e médio prazo. Nessa estrutura, as usinas produtoras podem vender parte ou a totalidade

da energia produzida em contratos bilaterais diretamente a consumidores livres, comercializadores, importadores e exportadores de energia. Todos os contratos devem ser registrados na CCEE, que realizará a liquidação financeira das diferenças entre os montantes contratados e o que foi efetivamente consumido (CCEE, 2018b).

No ACR, a usina deve participar dos leilões de energia promovidos pela CCEE, cujos contratos são regulados pela ANEEL e os preços estabelecidos nos próprios leilões, onde se adota como critério a modalidade de menor preço para a contratação de energia. Os empreendimentos vencedores no ACR recebem contratos de comercialização de energia com prazos de 15 a 30 anos, conferindo-os a obrigação de estarem aptos a fornecer energia durante o longo prazo desses contratos (CCEE, 2018b).

É importante ressaltar que um ambiente não exclui o outro, isto é, empreendimentos termelétricos podem comercializar energia no mercado livre e regulado ao mesmo tempo, desde que tenham capacidade para tal, em cumprimento às cláusulas contratuais dos mercados aos quais estão expostos. Caso o empreendimento não cumpra as condições de comercialização ofertadas no leilão (ambiente regulado), a normatização prevê uma série de mecanismos denominados de ressarcimentos, onde o agente comprador fica protegido do não suprimento do vendedor (CCEE, 2015).

Nessa estrutura existem vários tipos de contratos, sendo que para os contratos provenientes de leilões, sua denominação é CCEAR – Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado. Dentro do CCEAR existem duas modalidades que variam de acordo com as condições de cada empreendimento e dos leilões: i) CCEAR por Quantidade: no qual os agentes vendedores (geradores) assumem os riscos hidrológicos; ii) CCEAR por Disponibilidade: no qual os agentes compradores assumem os riscos hidrológicos.

Na prática, os contratos por Quantidade têm sido estabelecidos nos leilões para a contratação de energia de usinas hidrelétricas, enquanto os

contratos por Disponibilidade para usinas termelétricas<sup>2</sup>. Em relação à forma de contratação, as usinas contratadas na modalidade por Quantidade são selecionadas pelo critério de menor preço, onde o cálculo é baseado na estimativa de possíveis cenários de fluxos de caixa em razão do risco hidrológico intrínseco ao empreendimento. Já na modalidade por Disponibilidade, as geradoras vencedoras não assumem o risco hidrológico (que é da distribuidora, ou compradora), e o método empregado para a seleção no certame é o Índice de Custo Benefício (ICB), representando o critério de ordenação econômica dos empreendimentos de geração termelétrica. O ICB é a razão entre o custo global do empreendimento e o benefício energético da usina e seu valor deve ser determinado segundo a metodologia publicada pela EPE (EPE, 2011).

Importante notar, conforme aponta Seratto (2010), que um empreendimento interessado em gerar e comercializar energia no ACR de fontes alternativas somente poderá participar dos leilões se existir oferta de lotes para contratos na modalidade por Disponibilidade, em seus respectivos editais. Como a prerrogativa dos contratos por Disponibilidade é a usina estar disponível para gerar energia quando for necessário, empreendimentos termelétricos que utilizam biomassas agroindustriais que geram energia sazonalmente (em razão da disponibilidade do combustível também ser sazonal) têm características técnicas e operacionais que são compatíveis aos contratos por Disponibilidade<sup>3</sup>.

Diferentemente de outras biomassas, como as agroindustriais, a biomassa florestal pode ser fonte de energia durante o ano todo, ou seja, de forma não intermitente, e não possui diferenciação de safras e entre safras do ponto de vista temporal. A colheita florestal pode ser manejada para que haja madeira disponível para energia durante o ano todo. Isso faz com que, tecnicamente, a biomassa florestal possa atuar em outros

---

<sup>2</sup> Válido ressaltar que nos Leilões de Energia de Reserva também existem contratos por Quantidade para usinas eólicas, biomassa e solar, mas são contratos regulados visando, exclusivamente, ao aumento da segurança no fornecimento de energia ao SIN.

<sup>3</sup> Mais a frente esse trabalho levantará uma crítica a essa questão no que tange especificamente ao emprego da biomassa florestal na geração termelétrica. Essa questão será tratada na seção de discussões.

modelos de contratação, o que praticamente ainda não ocorre nos leilões e nos editais<sup>4</sup>.

Para se habilitar a participar dos leilões de energia elétrica no ACR, o empreendimento de geração precisa apresentar previamente à EPE dentre os principais documentos: i) os estudos de viabilidade técnica e econômica do projeto; ii) os estudos e relatórios de impacto ambiental – EIA/RIMA; e iii) as licenças ambientais prévias de instalação dos empreendimentos. Esse processo é denominado Cadastramento e Habilitação Técnica (EPE, 2014). Caso vença a respectiva licitação, o empreendimento (usina) recebe a concessão das usinas hidrelétricas ou a autorização para a construção das unidades termelétricas.

Existem diversos tipos de leilões de geração de energia, com diferentes características e fontes energéticas negociadas<sup>5</sup> (Quadro 2). As fontes de biomassa usualmente participam de três tipos: Leilão de Fontes Alternativas (LFA), Leilão de Energia Nova (LEN) e Leilão de Energia de Reserva (LER). Os leilões ocorrem desde 2002 – quando ainda eram realizados pelo Mercado Atacadista de Energia (MAE), antecessor da CCEE, e a partir de 2004 pela própria CCEE, representando de fato o marco do início do novo modelo do setor elétrico nacional.

Quadro 2: Tipos de Leilões de Geração Regulados no ACR

<b>Leilão</b>	<b>Objeto</b>	<b>Tipo / Vigência</b>
<b>Energia Nova</b>	Novos empreendimentos	A-5 e A-3 / De 15 a 30 anos, contados do início do suprimento
<b>Energia Existente</b>	Usinas já construídas e em operação	De 5 a 15 anos, contados do ano seguinte ao da realização do leilão
<b>Energia Reserva</b>	Empreendimentos novos ou já existentes	Contabilizado e liquidado no mercado de curto prazo
<b>Ajuste</b>	Usinas já construídas e em operação	De 3 meses a 2 anos

<sup>4</sup> Somente um empreendimento termelétrico a biomassa florestal foi contratado até hoje na modalidade por Quantidade, que foi a usina Guaçu, em operação no Mato Grosso.

<sup>5</sup> Válido ressaltar que outros três tipos de leilão de geração já ocorreram: Leilão de venda, em 2002; o Leilão de Excedentes, em 2003; e o Leilão de Compra, realizados em 2003 e 2004. Todos realizados pelo Mercado Atacadista de Energia (MAE), antecessor da CCEE.

<b>Fontes Alternativas</b>	Eólica, biomassa e PCHs	De 10 a 30 anos, contados do início do suprimento
<b>Estruturantes</b>	Empreendimentos de grande porte indicados pelo CNPE	Preços livremente negociados na geração e comercialização

Fonte: Elaboração própria a partir de CCEE (2017a). PCHs = Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Também existe o mercado de curto prazo, denominado como mercado de diferenças (ou mercado *spot*), onde é feito o ajuste entre os volumes contratados e os volumes medidos de energia produzida. Neste mercado a CCEE apura os montantes efetivamente produzidos e consumidos por cada agente do ACR e ACL, e contabiliza as diferenças para posterior liquidação financeira, sendo valoradas ao Preço de Liquidação de Diferenças (PLD). No mercado de curto prazo não existem contratos, apenas a contratação multilateral, onde o objetivo é assegurar o suprimento e o equilíbrio dos contratos e garantir o direito dos empreendimentos geradores, dos distribuidores e consumidores (CCEE, 2018b).

Atualmente, portanto, os contratos de compra e venda de energia ocorrem exclusivamente sob parâmetros legalmente estabelecidos, inclusive os contratos no ACL, que são livremente negociados. Os vendedores podem ser usinas geradoras elétricas, comercializadores, produtores independentes ou autoprodutores, e os compradores são as distribuidoras e consumidores livres, todos atuantes do SIN (CCEE, 2018b). A Figura 1 apresenta um esquema representativo da participação de uma usina termelétrica no setor elétrico brasileiro.



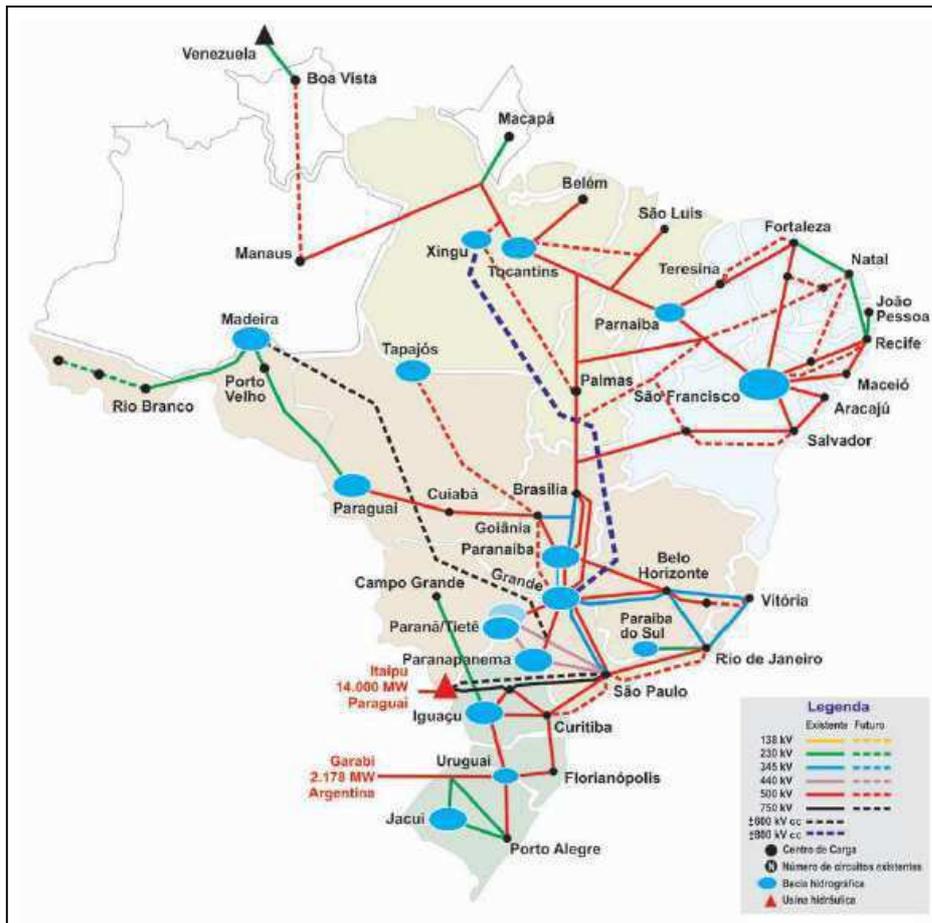


Figura 2: Integração eletroenergética do sistema elétrico brasileiro em 2015 (EPE, 2016a).

Para atender a carga de energia prevista para o SIN ao menor custo, cabe ao coordenador e operador do sistema (Operador Nacional do Sistema Elétrica, ONS) garantir a otimização energética com a minimização do custo total de operação, ou seja, o custo presente mais o custo futuro de operação ao longo do horizonte de estudo, bem como evitar vertimentos nos reservatórios.

A depender do cenário, essa otimização poderá sinalizar a necessidade de utilização de energia advinda da geração térmica, como complementar a geração hidrelétrica. Isso ocorre devido aos diferentes cenários e fundamentos aos quais o operador do sistema deverá considerar na tomada de decisão (EPE, 2016a).

Segundo relatório da Empresa de Pesquisa Energética, denominado *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear* (EPE, 2016a), para determinar os cenários de decisão entre usar a água dos

reservatórios ou usar as térmicas, o ONS leva em conta os seguintes aspectos: i) a volatilidade interanual dos rios brasileiros, com grande dispersão em relação à vazão média anual; ii) a sazonalidade intra anual entre o período seco e úmido; iii) a complementariedade e diversidade regional entre as bacias hidrográficas brasileiras; e iv) o acoplamento espacial e temporal das decisões, que afeta diversos agentes e está associada a grande responsabilidade da decisão no momento do uso do recurso hidráulico.

Nesse exercício de otimização, o objetivo do ONS será buscar o menor custo, em média, para o consumidor, com horizontes distintos que variam de curto até médio prazo – horas, dias, semanas, meses até cinco anos. Para realizar essa tomada de decisão, o operador do sistema utiliza modelos matemáticos e ferramentas de planejamento energético para otimizar o uso dos recursos do SIN. De modo geral, o objetivo desses modelos é o de determinar o despacho das gerações hidrelétrica e térmica que minimiza o custo de operação do sistema ao longo do período de planejamento (EPE, 2016a; MARZANO et al., 2007).

O planejamento e a programação da operação deste sistema hidrotérmico é feito a partir de uma cadeia de modelos de otimização em distintas etapas, abrangendo o longo, médio e curto prazo de planejamento da operação energética. Cada etapa utiliza diferentes modelos com distintos graus de detalhamento visando a representação do sistema. A seguir uma breve explicação de cada modelo computacional:

- NEWAVE: a coordenação hidrotérmica a médio prazo (até cinco anos) é realizada pelo NEWAVE, desenvolvido pelo CEPEL, o Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Seu objetivo é determinar a estratégia de geração hidráulica e térmica em cada estágio, a partir da alocação ótima dos recursos hidrelétricos e termelétricos de maneira a minimizar o valor esperado do custo de operação para todo o período de planejamento. Assim, o modelo NEWAVE simula um elevado número de cenários hidrológicos, com as afluências dos reservatórios, e tem-se como resultado destes estudos as funções de custo futuro, que são traduzidos nos custos totais mensais de geração elétrica (hídrica e térmica) e nos

Custos Marginais de Operação (CMO) (EPE, 2016a; MACEIRA et al., 2008; MARZANO et al., 2007).

- DECOMP: para o curto prazo, é utilizado o modelo DECOMP, também desenvolvido pelo CEPEL, que tem por objetivo determinar a alocação ótima de recursos hídricos e térmicos que minimiza o custo de operação ao longo do período de planejamento, isto é, para todas as semanas do primeiro mês e para o restante dos meses do período de planejamento. Para tal, o modelo leva em conta todo um conjunto de informações disponíveis – carga, vazões, disponibilidades, limites de transmissão entra subsistemas, função de custo futuro do NEWAVE e mecanismos de aversão ao risco. Além disso, tem-se como resultado metas de geração por usina de cada submercado e custos marginais de operação para cada estágio, por patamar de carga (DINIZ et al., 2008; EPE, 2016a; MACEIRA et al., 2002).

A Figura 3 aborda de forma esquemática como se dá a decisão de despacho do operador.

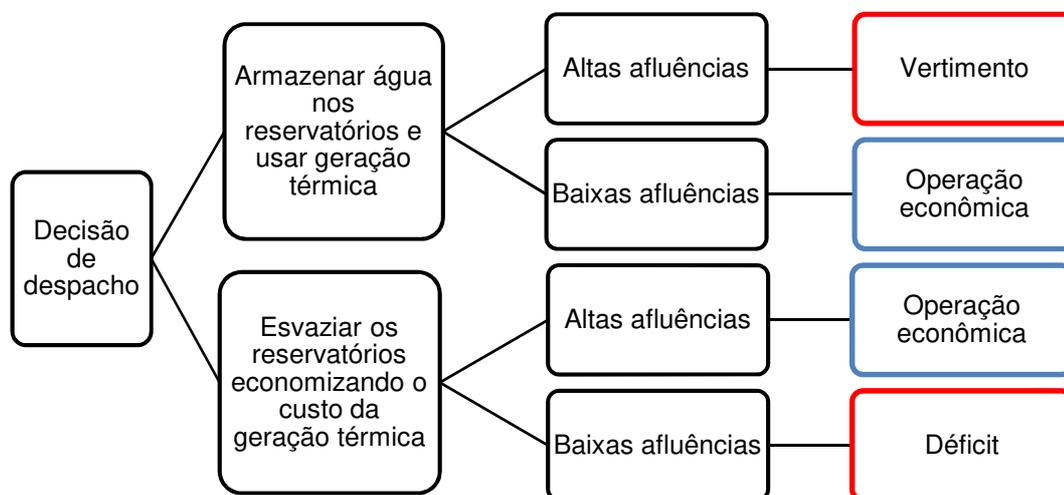


Figura 3: Dilema do Operador relacionado ao acoplamento temporal das decisões. Fonte: Adaptado de EPE (2016a) e BATISTA et al. (2017).

De acordo com essa lógica, portanto, segundo Marzano et al. (2007), o uso ótimo da água armazenada nos reservatórios é aquele que minimiza o custo de geração termelétrica no presente, com o valor esperado do custo de geração termelétrica até o fim do horizonte de

estudo. Esse desafio de prever a operação futura do SIN também pode ser denominado “Dilema do Operador” (EPE, 2016a).

Do ponto de vista de uma termelétrica que atua em contratos na modalidade por Disponibilidade no ambiente regulado, como as de biomassa florestal, essa tomada de decisão por parte do operador do sistema afetará a sua receita variável ao longo da vida útil do empreendimento. Isso ocorre porque a receita dessa usina é composta por uma Receita Fixa anual, que é a receita requerida pelo empreendedor e submetida na ocasião do leilão, e a Receita Variável, que dependerá do montante de energia a ser despachado (ou não) em razão da tomada de decisão do operador do sistema<sup>6</sup>.

### **3.2. Participação da biomassa florestal no setor elétrico**

Após apresentados os aspectos regulatórios e de mercado do setor elétrico atual, esta subseção abordará a participação da biomassa florestal como fonte de energia termelétrica atualmente.

Conforme dados do Banco de Informações de Geração – BIG, da ANEEL (Tabela 1), atualmente o Brasil possui mais de 4.900 usinas em operação, com uma capacidade total instalada acima de 165,83 GW<sup>7</sup>. Embora a capacidade de geração hidrelétrica seja predominante (64,83%), uma parte relevante da capacidade é advinda de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis (17,04%), e apenas 8,82% é referente a usinas a biomassa agroflorestal – sendo o restante composto por eólica (7,53%), nuclear (1,2%) e solar (0,58%).

As usinas movidas a biomassa agroflorestal são compostas pelas usinas a resíduos agroindustriais, onde a principal fonte é o bagaço de cana de açúcar, seguido pela biomassa florestal, resíduos sólidos

---

<sup>6</sup> Ressalta-se que a receita variável visa apenas devolver ao agente gerador os custos operacionais de despacho acima da inflexibilidade, e não remunerar o investimento realizado. A metodologia de cálculo das receitas está explicitada na seção de Materiais e Métodos.

<sup>7</sup> Dados obtidos através do Banco de Informações de Geração – BIG, da ANEEL, através do site <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>, atualizados em 02 de fevereiro de 2018.

urbanos, resíduos animais e biocombustíveis líquidos, em ordem de participação na produção termelétrica total.

Em referência à biomassa florestal, existem 95 UTEs em operação, sendo estas movidas a resíduos florestais (55) – onde o cavaco de eucalipto está inserido – licor negro (18), gás de alto forno de biomassa (10), carvão vegetal (8) e lenha (4). Os principais representantes são as usinas movidas a lixívia (licor negro – 2.551 MW) e a resíduos florestais (425 MW) e respondem juntas por uma capacidade agregada de 2.975 MW.

A maior parte dessas usinas se constitui de centrais privadas de geração de eletricidade e vapor, onde a maior capacidade é advinda do licor negro das fábricas de celulose e papel, que têm impulsionado o uso de biomassa para gerar eletricidade para consumo próprio e ainda produzir excedentes destinados à geração elétrica, abastecendo empresas que se localizam próximas às centrais termelétricas, e ainda fornecer eletricidade ao sistema nacional.

Embora o cavaco de eucalipto esteja classificado como resíduo florestal neste banco de dados do governo, este trabalho e alguns outros como Miranda et al. (2017), Nascimento e Biaggioni (2010), Rodrigues (2009), entendem que o cavaco não é um resíduo, e sim uma forma de beneficiamento da madeira *in natura*, ou propriamente da lenha, o que lhe confere vantagens do ponto de vista energético, conforme será abordado na seção de propriedades da madeira para energia, mais a frente.

Tabela 1: Fontes utilizadas para geração elétrica no Brasil, em fevereiro de 2018

Origem	Nº Usinas	Potência Outorgada (GW)	Participação na energia total (%)
Fóssil	2.457	28,25	17,04
Biomassa	548	14,63	8,82
<i>Florestal</i>	95	3,16	1,90
<i>Resíduos Florestais</i>	55	0,43	0,26
Nuclear	2	1,99	1,20
Hídrica	1.306	107,51	64,83
Eólica	508	12,48	7,53
Solar	82	0,97	0,58
<b>Total</b>	<b>4.677</b>	<b>161,88</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL: BIG - Banco de Informações de Geração. GW= Gigawatt.

Para melhor compreender esse cenário de emprego da biomassa florestal como fonte termelétrica, é importante traçar um paralelo com as demais fontes em utilização no país, bem como apontar seu histórico de uso.

Primeiramente, a realidade da produção da biomassa florestal como fonte energética é bastante diferente se comparada às hídricas e não renováveis. Historicamente, a relevância da biomassa florestal na matriz energética nacional esteve relacionada ao uso do carvão vegetal e da lenha (BRITO; CINTRA, 2004). Através de dados históricos do Balanço Energético Nacional (EPE, 2016b), expostos no Gráfico 1, a lenha já participou com mais de 60% da oferta total de energia primária no Brasil, sendo direcionada principalmente para os setores de transformação e residencial, tendo seu uso atrelado à produção de carvão vegetal (setor de transformação) e para aquecimento e cozimento (residencial).

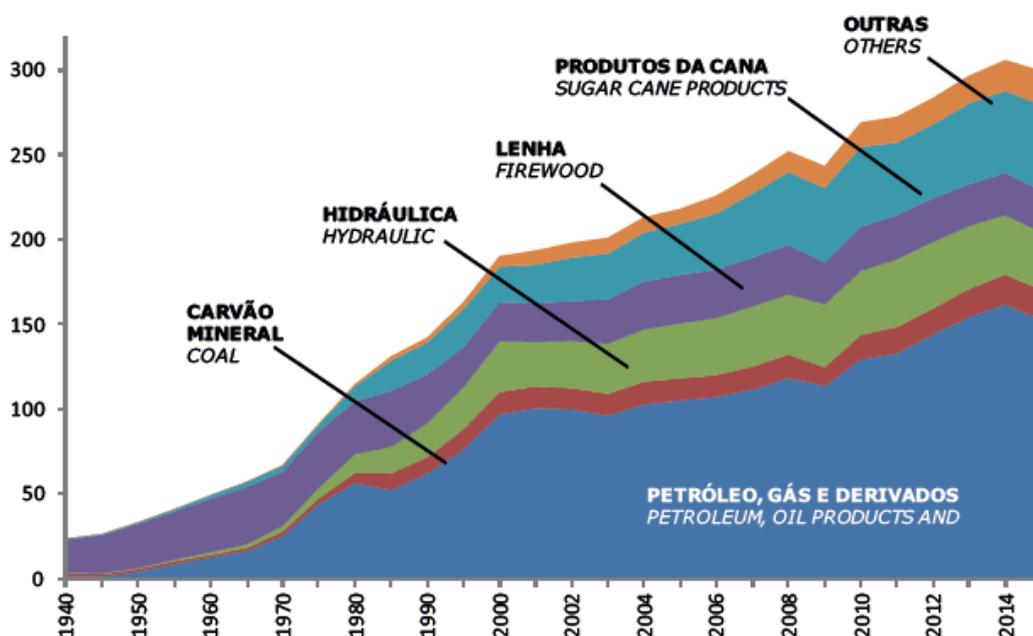


Gráfico 1: Evolução da oferta interna de energia por fonte ( $10^6$  tep) – Fonte: BEN – Balanço Energético Nacional, 2016 (EPE, 2016b).

A partir da década de 1970, com o maior incentivo ao uso de petróleo e seus derivados, principalmente nos setores industriais e de transporte, a madeira deixou de ser a principal fonte de energia primária

do Brasil, sendo substituída gradativamente pelos combustíveis fósseis e hidroeletricidade (COUTO; MÜLLER, 2013).

Na geração elétrica, sobretudo, a madeira perdeu espaço a partir dos anos 1970 em razão, principalmente, de dois fatores: o desenvolvimento de um parque gerador nacional baseado na hidroeletricidade, conforme apontado na subseção anterior, e sob a ótica do setor industrial, geradores elétricos foram desenvolvidos baseados no uso de combustíveis fósseis, que são mais eficientes do ponto de vista energético por possuírem maior poder calorífico (RODRIGUES, 2009). Destacam-se principalmente o óleo diesel, óleo combustível e mais recentemente o gás natural, que obteve evolução nas últimas décadas com o forte desenvolvimento do setor de exploração e produção de gás natural no Brasil (LAMAS; GIACAGLIA, 2013).

Por outro lado, a oferta de energia elétrica produzida com o uso de biomassa tem se destacado recentemente, adquirindo maior relevância a partir da crise de abastecimento que teve início em 1999, a qual culminou no colapso no sistema em 2001 – o “apagão”. A busca pelo aproveitamento de outras fontes energéticas, sobretudo as renováveis, e a criação de instrumentos e políticas públicas complementares e mais eficazes após 2001, voltadas ao incremento de fontes menos poluentes foram essenciais para o aumento da utilização da biomassa nos últimos anos (KHATIWADA et al., 2012).

De modo geral, a biomassa proveniente de fontes agroindustriais – principalmente o bagaço de cana de açúcar – tem avançado significativamente, sendo o principal responsável pela participação da biomassa na capacidade instalada de energia nacional. Atualmente, o bagaço de cana de açúcar representa 6,7% da capacidade instalada total do país, e 77,4% da potência de energia de biomassa total, enquanto que a florestal participa com, aproximadamente, 1,90% da capacidade total, e 21,6% da potência fiscalizada de energia de biomassa (ANEEL, 2018).

A partir dessa busca pelo melhor aproveitamento energético, observa-se que o setor industrial tem sido incentivador do uso de resíduos ou de matérias-primas como fontes energéticas derivadas de seu processamento primário. Conforme verificado por Seratto (2010), a

indústria sucroalcooleira e a indústria de papel e celulose têm sido estimuladores desse aproveitamento, através da utilização de resíduos como o bagaço da cana de açúcar, no caso da sucroalcooleira, e resíduos da colheita florestal e da produção de celulose, no caso de papel e celulose, o que tem gerado ganhos econômicos, ambientais e geração de empregos. Ainda segundo o autor, as principais usinas termelétricas de fontes de biomassa se localizam justamente nos polos dessas indústrias (SERATTO, 2010).

#### **- Usinas termelétricas à biomassa florestal em operação atualmente**

Para verificar a relação entre a localização das usinas termelétricas, esse trabalho fez um levantamento da localização e perfil industrial de cada uma das 55 usinas termelétricas a resíduos florestais cadastradas no Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2018)<sup>8</sup>. Os dados completos das usinas se encontram no Anexo (seção 8.1).

Com relação à localização, destas 55 usinas termelétricas em operação no país, observa-se através da Tabela 2 que a maioria se concentra na região Sul (24 usinas – 44%), com o Centro-Oeste em segundo (12 usinas – 22%), seguido pelo Norte, Sudeste e Nordeste. Verifica-se também que o estado de Santa Catarina é o principal detentor de termelétricas bem como o estado com maior potência instalada (112,7 MW – 26,5% da potência total).

Embora seja o segundo maior detentor de usinas, o Centro-Oeste, representado principalmente por Mato Grosso (nove usinas), não é o segundo maior em potência. Essa mesma relação ocorre com o Norte, representado principalmente pelo Pará (seis usinas). O Norte é a terceira região em número de usinas e também não possui grande potência (9,1% da potência total).

O Sudeste, representado pelos estados de Minas Gerais e São Paulo, respectivamente o primeiro e segundo maiores produtores de eucalipto do país em 2015, conforme dados da Produção da Extração

---

<sup>8</sup> O Banco de Informações de Geração apresenta os seguintes dados por usina: nome da usina, data de início de operação, potência, destino da energia, proprietário, município e registro.

Vegetal e da Silvicultura - PEVS (IBGE, 2015), possuem apenas oito usinas em operação (quatro para cada estado), embora seja a segunda maior região em potência, com 93,3 MW (21,9% do total), o que demonstra que as poucas usinas existentes possuem maior potência média.

Por possuírem poucos empreendimentos termelétricos a biomassa florestal, subentende-se que a aptidão florestal desses estados não está fortemente relacionada ao incentivo do uso energético da madeira, mas sim com outras finalidades de uso para essa biomassa, ou até mesmo compreende-se que a falta de uma política energética florestal também auxilia nessa reduzida participação<sup>9</sup>.

Tabela 2: Localização e potência das usinas termelétricas a biomassa florestal no país

Região/Estado	Nº Usinas	% do Total de Usinas	Potência (kW)	% do Total de Potência
<b>Sul</b>	<b>24</b>	<b>44%</b>	<b>191.180</b>	<b>44,9%</b>
SC	13	24%	112.650	26,5%
PR	8	15%	65.730	15,5%
RS	3	5%	12.800	3,0%
<b>Centro-Oeste</b>	<b>12</b>	<b>22%</b>	<b>85.475</b>	<b>20,1%</b>
MT	9	16%	71.475	16,8%
GO	2	4%	8.000	1,9%
MS	1	2%	6.000	1,4%
<b>Norte</b>	<b>10</b>	<b>18%</b>	<b>38.637</b>	<b>9,1%</b>
PA	6	11%	23.310	5,5%
AM	2	4%	9.027	2,1%
RR	1	2%	4.800	1,1%
AC	1	2%	1.500	0,4%
<b>Sudeste</b>	<b>8</b>	<b>15%</b>	<b>93.315</b>	<b>21,9%</b>
SP	4	7%	60.715	14,3%
MG	4	7%	32.600	7,7%
<b>Nordeste</b>	<b>1</b>	<b>2%</b>	<b>16.790</b>	<b>3,9%</b>
BA	1	2%	16.790	3,9%
<b>Total</b>	<b>55</b>	<b>100%</b>	<b>425.397</b>	<b>100%</b>

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL: BIG - Banco de Informações de Geração. kW= kilowatt.

Para a identificação do perfil dessas termelétricas, este trabalho classificou as usinas entre setores industriais relevantes para determinar se há a influência de modelos de indústria no estímulo ao uso da biomassa florestal como fonte energética, seja de resíduos ou cavacos.

<sup>9</sup> Essa questão ora levantada será ponto de crítica mais a frente, na seção de Discussões.

Foram determinadas quatro classificações, conforme Tabela 3:

a – Indústrias em Geral: que engloba qualquer indústria não relacionada diretamente ao setor madeireiro;

b – Indústria Madeireira;

c – Indústria de Celulose e Papel;

d – Indústrias de Energia: empreendimentos com o objetivo exclusivo de gerar energia,

A classificação foi feita a partir da análise dos registros dos proprietários de cada usina, segundo o banco de dados de geração do governo.

Das 55 termelétricas, 20 foram classificadas como pertencentes a Indústrias em Geral, compostas por empresas de alimentos, rações animal, agroindústrias em geral, químicos, plásticos e têxteis. Esses empreendimentos, embora não diretamente ligados ao setor madeireiro, podem utilizar a madeira em algum processo industrial, caracterizando o aproveitamento de resíduos para uso energético, ou também compram cavaco ou resíduos florestais para geração de energia elétrica. Muitos, inclusive, utilizam a cogeração em seus processos, isto é, fazem uso da energia térmica (vapor) e elétrica gerados através da biomassa como forma de se obter ganhos econômicos e de escala (SOUZA, 2012).

Outras 17 usinas são empreendimentos de energia, ou seja, empresas criadas para gerar energia renovável através da biomassa florestal, podendo vender a energia para o mercado livre ou regulado. Três destes empreendimentos, inclusive, foram vencedores nos leilões de energia: usinas Energia Madeiras (4 MW), ERB Candeias (16,9 MW) e Guaçu (30 MW), e estão em operação.

Também foram classificadas 12 usinas pertencentes a empreendimentos do setor madeireiro (móveis, laminados, serrados), e seis usinas do setor de celulose e papel. Ambas as indústrias fazem o aproveitamento dos resíduos de seus processos como fonte energética para geração elétrica.

As usinas também estão cadastradas na ANEEL conforme sua destinação energética, sob as siglas REG, PIE e APE. REG significa REGISTRO, ou seja, a UTE possui registro apenas para gerar energia

para consumo próprio. PIE significa Produção Independente de Energia, onde a UTE por sua conta e risco pode gerar energia para comercialização com distribuidoras ou diretamente com consumidores livres do mercado. E APE significa Autoprodução de Energia, onde o gerador produz energia para o consumo próprio, podendo, com a devida pré-autorização, comercializar o excedente, passando a ser denominado APE-COM. Das 55 usinas, 35 possuem REG, 10 são PIE e 10 são APE, o que significa que a maioria produz energia para consumo próprio.

Outra forma de comercialização de energia que vem sendo bastante praticada pelas usinas a biomassa florestal é a geração distribuída, que consiste em um modelo pelo qual a usina termelétrica produz energia para a própria empresa detentora dela, e o excedente elétrico gerado é vendido a empresas terceiras localizadas nas proximidades da geradora. Esse sistema exige reduzidos investimentos em redes de distribuição, e também diminui as perdas elétricas com a distribuição, o que é bastante comum na distribuição de energia a longas distâncias.

Segundo Foelkel (2016), esse arranjo pode ser chamado de “clusters florestais”, ou arranjos produtivos locais, bastante comuns no setor de celulose e papel. Nesse setor, inclusive, as fábricas mais modernas são praticamente autossuficientes na geração de vapor e eletricidade, conseguindo isso através da utilização de resíduos da colheita e da produção, como o licor negro, como insumos em suas usinas termelétricas cogeneradoras (FOELKEL, 2016).

Tabela 3: Perfil industrial das termelétricas a biomassa florestal e destinação da energia elétrica gerada.

<b>Perfil Industrial</b>	<b>Nº Usinas</b>	<b>Característica</b>
Indústrias em Geral	20	Não relacionadas diretamente ao setor madeireiro.
Energia	17	Criadas com o objetivo de gerar energia elétrica.
Indústria Madeireira	12	Produção, processamento e beneficiamento de madeira.
Celulose e Papel	6	Produção de celulose e papel.
<b>Destinação da Energia</b>		

REG	35	Registro = registradas somente para produção de energia própria.
PIE	10	Produção Independente de Energia = gera energia para comercialização com distribuidoras ou diretamente com consumidores livres.
APE	10	Autoprodução de energia = produz energia para o consumo próprio, podendo, com a devida pré-autorização, comercializar o excedente.

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL (2018).

A potência média destes 55 empreendimentos é de 7,73 MW, sendo a maior de 53,48 MW: UTE Ripasa, em Limeira, SP – de propriedade 100% da Suzano Papel e Celulose; e a menor de apenas 0,027 MW: UTE Gaseifamaz I, em São Paulo, SP – de propriedade 100% Biomass Users Network do Brasil.

Esses dados demonstram, portanto, que há diversificação no perfil dos empreendimentos que utilizam a biomassa florestal como fonte de energia elétrica, seja para consumo próprio ou para venda da energia no mercado. Nesse aspecto, portanto, fica claro que a biomassa florestal já é vista como um recurso energético viável por demais setores industriais, não sendo exclusiva das indústrias mais ligadas ao setor madeireiro, como as de papel e celulose, e a indústria de móveis e serrados.

#### **- Usinas termelétricas à biomassa florestal do Ambiente de Contratação Regulada**

No que se refere ao cenário das usinas termelétricas a biomassa florestal que participaram dos leilões de energia no ACR, esse trabalho também realizou levantamento das usinas de biomassa florestal que foram vencedoras nos leilões de energia elétrica e as características de cada empreendimento. Os dados são oriundos da publicação da CCEE, com a consolidação dos resultados de leilões de energia elétrica realizados desde 2004, onde constam todas as usinas vencedoras nos leilões (CCEE, 2018).

Com leilões ocorrendo desde 2004, sendo alguns exclusivos para as fontes renováveis – eólica, solar e biomassa – e com mais de 1.200 empreendimentos vencedores, seria razoável supor que muitas usinas de biomassa florestal estariam participando ou buscando participar de tais leilões. Entretanto, a realidade é bastante distinta: apenas doze empreendimentos termelétricos de biomassa florestal foram contratados para geração elétrica após vencerem em seus respectivos leilões. Destes, quatro estão em operação, sete em construção e uma em situação de desistência/suspensão da outorga (Tabela 4). Todas as UTEs estão classificadas como usinas a cavaco ou resíduos de madeira na CCEE. Os dados completos das usinas do ambiente regulado se encontram no Anexo (seção 8.2).

Tabela 4: Usinas termelétricas a cavaco de madeira que venceram nos leilões de energia do governo.

USINA	Leilão	Data	UF	Potência (MW)	Data Início Suprimento	Tipo de Contrato	Status
CISFRAMA (Energia Madeiras)	02ºLEN	29/06/06	SC	4,0	01/01/2009	Disponibilidade	Em operação
GUAÇU	04ºLER	18/08/11	MT	30,0	01/07/2014	Quantidade	Em operação
CANTO DO BURITI	16ºLEN	29/08/13	PI	150,0	01/01/2018	Disponibilidade	Desistência / Suspensão
CGB (Campo Grande)	16ºLEN	29/08/13	BA	150,0	01/01/2018*	Disponibilidade	Em construção
ERB Candeias	18ºLEN	13/12/13	BA	17,0	01/05/2018	Disponibilidade	Em operação
YTI (Costa Rica I)	20ºLEN	28/11/14	MS	164,0	01/01/2019	Disponibilidade	Em construção
YPE (Acre)	20ºLEN	28/11/14	AC	164,0	01/01/2019	Disponibilidade	Em construção
BOLT	21ºLEN	30/04/15	BA	50,0	01/01/2020	Disponibilidade	Em construção
SUZANO	15ºLEE	11/12/15	MA	255,0	01/01/2016	Disponibilidade	Em operação
ELDORADO (Onça Pintada)	23ºLEN	29/04/16	MS	50,0	01/01/2021	Disponibilidade	Em construção
PREDILECTA	23ºLEN	29/04/16	SP	5,0	01/01/2021	Disponibilidade	Em construção
CAMBARA	26º LEN	20/12/17	RS	50,0	01/01/2023	Disponibilidade	Em construção

Fonte: Elaboração própria a partir de CCEE, janeiro de 2018. LEN = Leilão de energia nova; LER = Leilão de energia de reserva; LEE = Leilão de energia existente. \*Não há informação sobre o início de operação dessas usinas ou o não cumprimento da data estipulada para início nas publicações do governo.

A maioria desses empreendimentos venceu no Leilão de Energia Nova (LEN), e apenas um no Leilão de Reserva, e um no Leilão de Energia Existente. Em relação ao perfil, importante ressaltar que diferentemente das demais termelétricas em operação atualmente no ambiente livre, as usinas vencedoras nesses leilões são grandes empreendimentos com maior potência instalada, chegando a até 255 MW no caso da UTE Suzano (Unidade Imperatriz). Essa UTE já participa do mercado regulado gerando energia para o sistema desde início de 2016. Somando-se a potência instalada de todas as doze UTEs, chega-se a uma potência total de 1.089 MW, contando as que ainda não entraram em operação e a UTE Canto do Buriti, que está em processo de cassação da outorga. E ao somar a Garantia Física destas usinas, chega-se a 786 MW médios<sup>10</sup>.

Em um exercício de comparação com as 52 usinas em operação (excluindo-se as três que venceram nos leilões) para avaliar o quanto as usinas do ambiente regulado podem adicionar de capacidade instalada para a biomassa florestal como um todo, verifica-se que a potência total das 52 UTEs é de 374,6 MW. Somando-se estas com as do ambiente regulado, chega-se a 1.463,6 MW. Portanto, o potencial de aumento é de 291% na potência instalada total.

Ao se analisar as principais variáveis econômicas dessas doze usinas, divulgadas pela CCEE, observa-se através da Tabela 5 que:

i) o ICB dos empreendimentos que ganharam de 2006 a 2013 é relativamente mais baixo se comparado ao ICB das usinas que ganharam de 2014 a 2017<sup>11</sup>. Em média o ICB dos empreendimentos do período 2006-2013 foi de R\$ 128,96 /MWh, e do período 2014-2017 de R\$ 202,67 /MWh (sem atualização monetária). E mesmo assim o ICB desse último período foi puxado para baixo por dois contratos da UTE Suzano

---

<sup>10</sup> A garantia física de energia de uma usina termelétrica é obtida por meio de sua oferta térmica e deverá ser limitada ao valor de sua disponibilidade máxima de geração contínua, conforme definição da Portaria MME Nº 101, de 22 de março de 2016 (MME, 2016).

<sup>11</sup> O último Leilão de Energia Nova ocorreu em 20/12/2017, do tipo A-6; e a única UTE de fonte de cavaco de madeira que saiu vencedora foi a UTE Cambara, do Rio Grande do Sul, 50 MW de potência, e Garantia Física de 46,1 MW médios.

(Unidade Imperatriz) que saiu vencedora em um Leilão de Energia Existente de 2015, com ICB de R\$ 129,50 /MWh e R\$ 144,98 /MWh. Excluindo-se estes dois contratos, o ICB médio dos participantes dos Leilões de Energia Nova seria de R\$ 224,48 /MWh. Atualizando-se esses valores conforme Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) de dezembro/2017, o ICB médio do primeiro período ficou em R\$ 188,27 /MWh, e no segundo R\$ 226,00 /MWh. Sem contar a UTE Suzano, a média ficou em R\$ 251,27 /MWh. Todos esses valores têm importância para a compreensão das estimativas de ICB que serão feitas no estudo de viabilidade econômica da seção de Resultados.

ii) O indicador calculado de Investimentos pela Potência Instalada (R\$/kW inst.), atualizado pelo IPCA de dezembro/2017, está na média de R\$ 5.145,7 /kW inst., com máximo de R\$ 6.406,9 /kW inst. das UTEs YPE e YTI, e mínimo de R\$ 2.910,7 /kW inst. da UTE ERB Candeias. Nem todos os empreendimentos têm o valor de investimentos divulgado. Estes valores demonstram que os empreendimentos com valor máximo necessitam de maiores investimentos para uma mesma potência instalada (maior capex), se comparados a UTE ERB Candeias, por exemplo, que necessita de menores investimentos para a mesma potência.

iii) Outro indicador calculado é o da Receita Fixa por total de energia contratada (R\$ /ano/MWh contratado), que apresentou média de R\$ 5,93 /ano/MWh contratado, com máximo de R\$ 7,56 /ano/MWh contratado da UTE Bolt, e mínimo de R\$ 2,57 /ano/MWh contratado da UTE ERB Candeias. Novamente a UTE ERB Candeias aparece como um empreendimento menos custoso, já que necessita de uma Receita Fixa menor para cobrir os gastos com a sua geração elétrica.

Tabela 5: Dados econômicos das termelétricas a biomassa florestal do ambiente regulado (em construção e em operação)

USINA	Garantia Física (MW médio)	ICB Histórico (R\$ /MWh)	ICB atualizado* (R\$ /MWh)	Receita Fixa / Energia contratada (R\$/ano/MWh)**	Investimentos /Potência Instalada (R\$ /kW inst.)**
CISFRAMA (Energia Madeiras)	2,3	133,92	255,75	5,61	-

GUAÇU	25,5	101,99	150,26	-	4.259,40
<b>CANTO DO BURITI</b>	<b>119,1</b>	<b>136,69</b>	<b>180,36</b>	-	<b>4.129,27</b>
CGB (Campo Grande)	122,1	136,69	180,36	-	4.366,79
ERB Candeias	14,9	135,49	174,59	2,57	2.910,69
YTI (Costa Rica I)	135,1	207,32	253,02	6,56	6.406,89
YPE (Acre)	135,1	206,90	252,51	6,54	6.406,89
BOLT	41,4	272,01	315,02	7,56	5.270,88
SUZANO (Contrato 1)	96,9	129,50	141,70	-	-
SUZANO (Contrato 2)	96,9	144,98	158,64	-	-
ELDORADO (Onça Pintada)	43,1	144,98	158,64	7,25	6.197,70
PREDILECTA	4,5	243,21	257,75	5,03	6.362,96
CAMBARA	46,1	199,00	210,90	6,35	-

Fonte: Elaboração própria a partir de CCEE (2018). \*ICB atualizado pelo IPCA de dezembro/2017. \*\*Indicadores calculados pelo trabalho.

Outros pontos que são relevantes de se destacar nesse cenário: i) diversos empreendimentos vencedores estão em construção, ainda sob certa incerteza do ponto de vista de fornecimento energético e cumprimento do início da data de suprimento de seus contratos. Inclusive, o empreendimento UTE Canto do Buriti sofreu penalidades e houve instauração de processo punitivo para cassação da outorga dessa UTE e execução das garantias, tendo em vista a desistência da empresa detentora em implantar a usina, conforme processos da ANEEL<sup>12</sup>; ii) as usinas em operação nos contratos do ambiente regulado são a Energia Madeiras, Guaçu, ERB Candeias e Suzano, e apenas a UTE Guaçu, localizada em Aripuanã, Mato Grosso, foi contratada sob a modalidade de Quantidade, onde a geradora deve fornecer um montante fixo de energia a um determinado preço, possuindo o risco de sobras ou déficits de energia a serem liquidados no PLD. As restantes estão contratadas por Disponibilidade; iii) as usinas Suzano e Eldorado são pertencentes às

<sup>12</sup> Conforme Processos de Nº 48500.005655/2013-92, 48500.001230/2017-38 e 48500.001231/2017-82 constantes em Relatório ANEEL de Novembro de 2017.

próprias empresas do setor de papel e celulose, e têm por objetivo utilizar resíduos da colheita e da produção (sob a forma de cavaco ou resíduos), na geração elétrica; iv) a usina Energia Madeiras pertence a uma indústria madeireira de Santa Catarina, e utiliza resíduos da produção para gerar energia para a usina e para o sistema; v) a usina Predilecta pertence à empresa Predilecta Alimentos, reconhecida nacionalmente no ramo alimentício. Quando iniciar sua operação, esta usina utilizará cavaco de madeira para geração de eletricidade, despachando para o sistema nacional, e a sobra para o próprio empreendimento, o que vai ao encontro dos modelos já estabelecidos em diversas indústrias de alimentos, laticínios, etc., que estão em operação no ambiente livre; vi) as demais usinas em construção: CGB Campo Grande, YTI Costa Rica I, YPE Acre, Bolt e Cambara, são empresas de energia com o objetivo de prover eletricidade através da energia de biomassa de plantios florestais próprios e de terceiros.

Em suma, essa seção demonstrou que o cenário atual de participação da biomassa florestal no setor elétrico ainda é bastante inexpressivo. As UTEs movidas a resíduos florestais e cavacos representam apenas 0,26% da capacidade total de energia elétrica do país. E o potencial esperado de expansão, que deverá vir das UTEs em construção do ambiente regulado, ainda pode ser afetado com atrasos e com alguma incerteza no que tange a capacidade de suprimento de seus plantios.

### **3.3. Características da biomassa florestal como fonte de energia**

Essa subseção tem como objetivo apresentar as principais características e propriedades relacionadas ao uso da biomassa florestal como fonte de energia termelétrica, tendo como base a revisão de literatura científica e técnica.

Avaliando-se o cenário brasileiro, observa-se que o crescimento dos plantios florestais e os avanços tecnológicos alcançados no campo da

silvicultura (manejo, condução, produtividade, genética, etc.) têm propiciado o maior uso da biomassa lenhosa como alternativa energética para a geração térmica, cogeração e centrais elétricas (BRITO, 2007). Diversas indústrias e segmentos agropecuários estão optando pela madeira para produção de energia térmica em detrimento dos combustíveis fósseis, principalmente dos óleos combustíveis e diesel (RIBEIRO; VALVERDE, 2016).

Em sua grande parte, a energia de biomassa florestal no Brasil é constituída pela produção do carvão vegetal, através da carbonização, e consumo direto da lenha, cavaco, licor negro e resíduos florestais via combustão (COUTO; MÜLLER, 2013). Além da lenha, os resíduos de madeira têm sido muito utilizados nos últimos anos para a geração de energia, deixando de ser um passivo ambiental e passando a ser uma fonte de energia renovável e de baixo custo (PELKONEN et al., 2014).

O carvão vegetal é utilizado principalmente como redutor em fornos siderúrgicos, fábricas de cimento e uso residencial, enquanto que a lenha é utilizada através da queima direta em restaurantes, hotéis, indústria de cerâmica, olarias, padarias, etc. Já o cavaco tem sido empregado principalmente na geração térmica industrial e nas usinas termelétricas a vapor (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Segundo Macedo (2003), pode-se dividir as fontes de biomassa florestal para conversão em três tipos: i) resíduos de cultivo florestal, compostos por cascas, galhos, ramos, tocos, raízes; ii) resíduos de processamento industrial, que podem ser serragem, pós, maravalhas, cantoneiras, etc.; e iii) plantios florestais comerciais, que no Brasil são compostos principalmente por plantios de espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (MACEDO, 2003).

Uma quarta forma de biomassa florestal pode ser determinada através dos materiais densificados, compostos por pellets e briquetes (SAIDUR et al., 2011). Estes materiais são fruto do beneficiamento da madeira visando seu uso energético na combustão direta, e sua principal característica é a maior densidade energética. Conforme Rodrigues (2009), na densificação da madeira, onde ocorre sua secagem e transformação física em pellets e briquetes, a biomassa passa de 150 a

500 kg/m<sup>3</sup> de densidade para uma faixa de 1.000 a 1.300 kg/m<sup>3</sup>, conferindo-a melhores características para seu uso como fonte energética.

No que tange diretamente às suas características energéticas, para Vital et al. (2013), a qualidade da madeira é uma combinação de características físicas, químicas, anatômicas e térmicas de uma árvore – ou de suas partes – que permitem sua melhor utilização visando determinado uso final. Para os autores, as principais propriedades da biomassa para energia basicamente são: densidade da madeira, poder calorífico, umidade, composição química elementar, imediata e estrutural, teor de inorgânicos e o comportamento térmico da biomassa.

Por mais que o conhecimento das características energéticas abordadas seja fundamental para a escolha da espécie arbórea visando a produção de energia, se observa que em muitas regiões, e principalmente aquelas com menor grau de desenvolvimento socioeconômico, a escolha da espécie é baseada no conhecimento empírico do potencial da madeira, e na sua aceitação como fonte de renda em mercados locais (DOBIE; SHARMA, 2015; NAIR et al., 2009).

A decisão acerca da finalidade do plantio também é considerada um ponto importante durante a fase de planejamento do reflorestamento. No caso da destinação da madeira para fins energéticos – cavaco, por exemplo – o conhecimento das propriedades físicas e químicas, e das características da espécie a ser plantada (composição elementar, densidade básica e poder calorífico), são fatores significativos para a tomada de decisão na implementação de um projeto de reflorestamento visando a utilização da biomassa florestal como fonte energética.

Outros pontos importantes do uso da biomassa florestal como fonte energética se referem: i) a baixa densidade energética por unidade espacial, se comparada aos combustíveis fósseis, o que leva a altos custos para colheita, transporte e armazenamento; ii) a forte economia de escala das tecnologias de conversão, isto é, o investimento por unidade de insumo cai e a eficiência da conversão aumenta com a elevação da capacidade (MULLER, 2005).

Dessa maneira, torna-se importante determinar quais as principais propriedades da biomassa florestal para o uso energético no setor elétrico.

- Poder Calorífico: conforme Quirino et al. (2004), o poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor através da combustão de uma unidade de massa de madeira. Pode ser expresso em calorias por grama (cal/g) ou quilocalorias por quilograma (kcal/kg). O conhecimento do poder calorífico da biomassa também auxilia no dimensionamento dos equipamentos, desde a parte de campo, transporte, até as instalações industriais. O poder calorífico superior (PCS) em conjunto com a umidade, formam o poder calorífico útil (PCU), que, por sua vez, é o índice que considera a energia necessária para evaporar a água do combustível e tem relação direta com a quantidade de energia liberada durante a combustão da madeira em condições de campo.

- Densidade básica: a densidade é um importante parâmetro para a avaliação da qualidade da madeira para energia, e pode ser definida como a quantidade de massa por unidade de volume (CARNEIRO et al., 2014). Existem dois tipos de densidade a serem considerados no uso da madeira como fonte energética: i) densidade básica: considera a razão entre a massa seca e o volume saturado de madeira, usualmente empregada para seleção de materiais genéticos. A madeira do gênero *Eucalyptus*, por exemplo, apresenta densidade básica média em torno de 500 kg/m<sup>3</sup>. ii) densidade a granel: considera os espaços vazios junto as peças de madeira. No mercado de cavaco de madeira, a densidade a granel é o índice mais indicado a ser utilizado em razão da facilidade de sua determinação.

- Densidade energética: a densidade energética pode ser definida como a quantidade de energia útil liberada por um combustível por unidade de volume, quando submetido à combustão. Para Magalhães (2016), o conhecimento da densidade energética de determinada

biomassa permite avaliar seu potencial para geração de energia, tendo em vista que cargas com maiores densidades energéticas contribuem positivamente para a otimização do transporte, reduzindo custos e aumentando o raio de abrangência. A densidade energética é obtida através do produto da densidade a granel pelo poder calorífico útil, considerando o mesmo teor de umidade para ambos (JESUS et al., 2017).

- Teor de umidade: a umidade é um importante fator que deve ser levado em consideração em qualquer biomassa destinada à combustão, sendo preferível sempre o seu uso com menor umidade possível (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Os principais efeitos da alta umidade na madeira para energia são a redução do poder calorífico útil, redução da temperatura na câmara de combustão com conseqüente perda da eficiência e produtividade dos equipamentos, e o aumento no consumo de biomassa e de emissões atmosféricas (WIECHETECK, 2009).

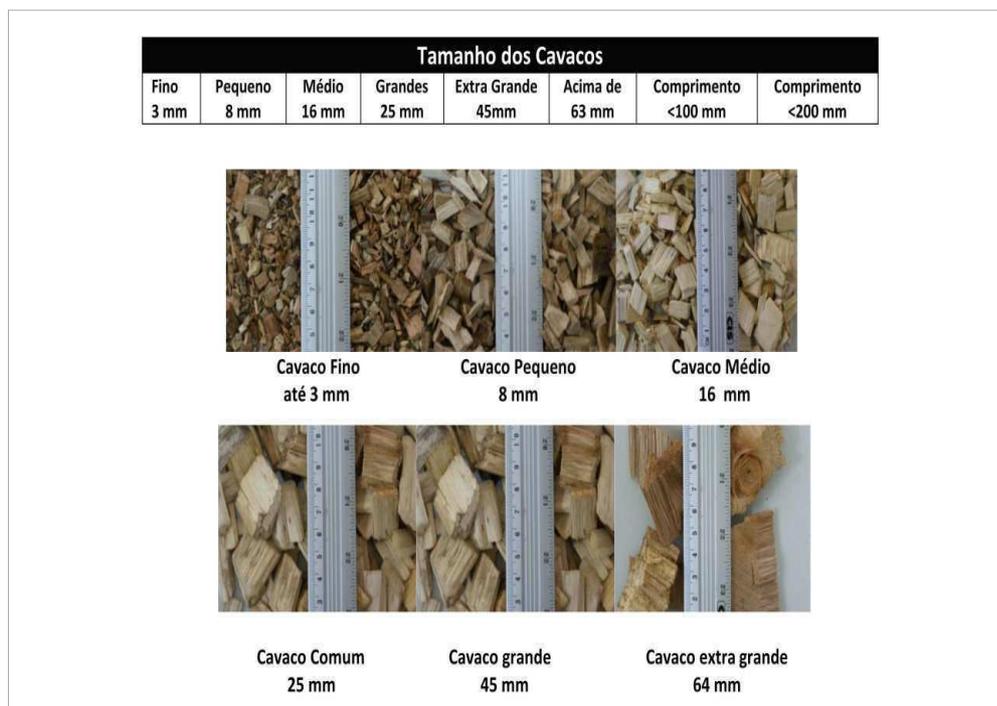
### **3.4. Características do cavaco de *Eucalyptus sp.* no emprego em usinas termelétricas**

Uma das formas de utilização da biomassa florestal que tem sido amplamente difundida é sob a forma de cavaco, que consiste na picagem ou destroçamento da lenha ou resíduos em pequenos fragmentos de tamanhos que variam usualmente de 15 a 45 mm de comprimento. Os cavacos de madeira podem ser obtidos por estilhaçamento nos picadores a disco ou em corte reto nos picadores a tambor, contendo algumas partículas mais longas e algum percentual de finos, conforme apontado na Figura 4 (SERATTO, 2010).

A qualidade do cavaco depende fundamentalmente da matéria-prima e da tecnologia utilizada na sua produção, sendo que as espécies florestais mais utilizadas para a transformação em cavaco no Brasil são o pinus e o eucalipto. O cavaco não pode ser considerado um resíduo, por ser fruto de um beneficiamento através do destroçamento em picadores,

não sendo um passivo ambiental de uma produção industrial (NASCIMENTO; BIAGGIONI, 2010).

Figura 4: Especificações dos tamanhos de cavacos de madeira



Fonte: LIPPEL (2017)

Segundo Nascimento e Biaggioni (2010), com a utilização do cavaco é possível reduzir o custo da energia térmica gerada em comparação com o uso da lenha no processo, uma vez que o cavaco permite maior mecanização do processo e menor custo com mão de obra, o que impacta diretamente no custo final da energia. Embora o uso do cavaco tenha crescido bastante nos últimos anos, algumas características observadas são importantes de serem citadas:

- Baixa densidade: sua baixa densidade em comparação aos combustíveis fósseis faz com que o transporte a longas distâncias e seu armazenamento possivelmente elevem o seu custo final. O Quadro 3 apresenta a comparação de densidade e poder calorífico entre diferentes fontes de combustível.

Quadro 3: Densidade e PCU dos diferentes combustíveis

Fontes de combustíveis	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	PCU (Kcal/kg)
------------------------	--------------------------------	---------------

<b>Fontes de combustíveis</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCU (Kcal/kg)</b>
Lenha	500	2.750*
Cavaco	333	2.750*
Óleo combustível	980	9.550
Óleo diesel	840	10.100
Gás natural	0,74	9.000
GLP	552	11.200

Fonte: Elaborado a partir de Miranda et al. (2017). \*Considera teor de umidade de 30%.

- Baixo poder calorífico e teor de umidade variável: como o índice de poder calorífico depende fortemente do teor de umidade, grandes variações de umidade podem afetar tanto a qualidade da energia térmica gerada quanto a quantidade de combustível necessária para a demanda de energia, afetando diretamente o custo de operação das caldeiras. Portanto, para se obter maior eficiência do processo térmico é necessário buscar menor teor de umidade e maior padronização dos lotes de cavacos.

- Logística e armazenamento: para reduzir o custo final, o cavaco armazenado e a central com picador não devem estar a uma distância muito afastada da usina termelétrica.

Segundo Blaselbauer (2010), o PCU do cavaco e seu consumo variam fortemente com a variação no teor de umidade da biomassa, sendo que elevados teores de umidade reduzem bastante o PCU e aumentam a quantidade de cavaco necessária para suprir a demanda energética, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: PCU e consumo de cavaco em razão da variação na umidade

<b>Umidade (%)</b>	<b>Poder Calorífico/Kg Cavaco</b>	<b>Consumo (Kg)<sup>1</sup></b>	<b>Aumento no Consumo<sup>2</sup> (%)</b>
10	3930	254,45	-
15	3675	272,11	6,94
20	3425	291,97	14,74
25	3175	314,96	23,78
30	2925	341,88	34,36
35	2675	373,83	46,92

Umidade (%)	Poder Calorífico/Kg Cavaco	Consumo (Kg) <sup>1</sup>	Aumento no Consumo <sup>2</sup> (%)
40	2425	412,37	62,06
45	2175	459,77	80,69
50	1920	520,83	104,69
55	1670	598,80	135,33
60	1420	704,23	176,76
65	1170	854,70	235,90

Fonte: Blaselbauer, 2010. 1: Para gerar 1.000.000 Kcal; 2: Em relação ao cavaco com 10% de umidade.

Segundo Nascimento (2007), o teor de umidade do cavaco de eucalipto entregue nas indústrias e usinas varia bastante e depende das condições climáticas e regionais. Em épocas de seca é possível a entrega de cavacos pelos produtores com umidade próxima a 30% a 40%, necessitando-se de um período de secagem da madeira em campo superior a 150 dias antes da transformação em cavacos. Nas épocas chuvosas, a secagem em campo é dificultada, sendo comum a entrega do cavaco com umidade próxima a 50%, o que pode afetar o processo de combustão e conseqüentemente, a eficiência da geração elétrica.

### **3.5. Tecnologias de conversão com base na biomassa florestal**

A energia termelétrica pode ser determinada como toda e qualquer energia produzida por uma central cujo funcionamento ocorre a partir da geração de calor resultante da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, gerando ao final eletricidade. Os principais combustíveis utilizados nas usinas termelétricas são os combustíveis fósseis, com destaque para o carvão mineral (principalmente no resto do mundo), nafta, petróleo, gás natural e, mais recentemente, a biomassa agroflorestal (EPE, 2016a).

Conforme apontado por Macedo (2003) e Müller (2005), as tecnologias para produção elétrica a partir da biomassa mais difundidas podem ser divididas em dois grupos: i) ciclos a vapor, onde há a

combustão da biomassa em caldeiras convencionais; e ii) gaseificação da madeira em leito móvel ou fluidizado com utilização do gás gerado em turbinas. No entanto, esse segundo grupo ainda é considerado bastante oneroso e pouco consolidado no país.

A tecnologia mais consolidada no Brasil é a do ciclo a vapor (Rankine<sup>13</sup>), considerado uma rota tecnológica simples que se fundamenta no uso de água/vapor como fluidos de transporte e armazenamento de energia. Nesse processo, ocorre a combustão direta da biomassa florestal para geração de vapor superaquecido, que, por sua vez, alimenta turbinas a vapor para geração de energia elétrica de origem térmica (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008; FOELKEL, 2016).

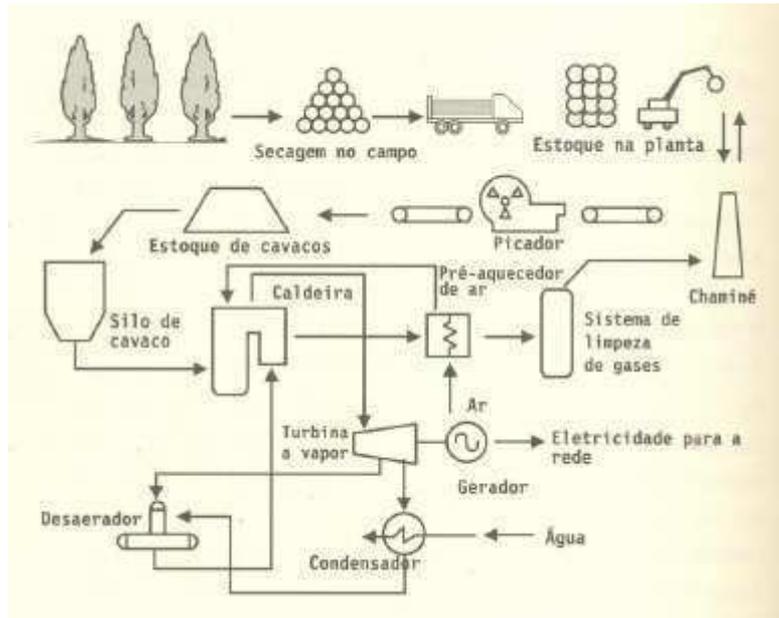
Segundo Foelkel (2016), existem outras tecnologias de geração de eletricidade a partir de biomassas florestais em evolução, como a produção de bio-óleo pela pirólise rápida da biomassa florestal, gerando um combustível líquido, e a própria gaseificação da madeira, nas denominadas biorrefinarias de base florestal. Mas essas tecnologias ainda são caras e têm sido mais estudadas e utilizadas em países como Suécia, Alemanha e Estados Unidos.

Portanto, o funcionamento de uma usina termelétrica a cavaco ocorre da seguinte forma: a queima do combustível propicia o aquecimento da água armazenada no reservatório em caldeiras, o que forma um vapor superaquecido, que, por sua vez, é direcionado para as turbinas do gerador responsáveis pela produção de eletricidade. Essa eletricidade pode ser consumida pela própria indústria detentora da UTE, como ocorre em diversos setores apresentados na seção 3.2, ou pode ser destinada ao sistema elétrico, consumidores cativos, ou geração distribuída, via redes de distribuição elétrica. A Figura 5 apresenta um esquema simples de uma UTE a cavaco.

---

<sup>13</sup> O ciclo Rankine tem essa denominação em homenagem ao físico e engenheiro escocês William John Rankine, notável por seus diversos trabalhos em termodinâmica.

Figura 5: Esquema simples de uma Usina Termelétrica a cavaco de madeira



Fonte: BARROS; VASCONCELOS (2001).

Nas usinas geradoras maiores, como as diretamente ligadas às indústrias de papel e celulose, as turbinas a vapor costumam ser de extração, condensação e contrapressão, e operam com pelo menos dois ou três turbogeradores, com potência instalada de 100 a 250 MW. Essas usinas normalmente realizam a cogeração de vapor e eletricidade de forma simultânea, sendo que o vapor é destinado ao próprio arranjo produtivo e o excedente elétrico vendido a empresas ou ao sistema elétrico nacional. Os tipos de biomassa florestal utilizados vão desde o licor negro Kraft, os resíduos lenhosos da colheita e dos processos industriais, como cavacos, serragens, pós, cascas, toras, galhos, ramos, tocos, etc. (FOELKEL, 2016).

Em relação à eficiência de conversão dessas usinas a biomassa florestal, Foelkel (2016) comenta que a principal característica desses sistemas é o baixo rendimento de conversão da energia primária útil gerada pela biomassa em energia elétrica, que costuma ser de 15 a 35%, onde os menores rendimentos normalmente ocorrem nas pequenas centrais termelétricas, que trabalham com vapores superaquecidos em pressões mais baixas, e os maiores rendimentos nas usinas mais modernas que adotam a cogeração e evitam ao máximo a condensação do vapor liberado pelas turbinas.

Dessa maneira, os principais fatores que afetam a eficiência do sistema no ciclo a vapor (Rankine) são a escala de produção, a pressão/temperatura do vapor superaquecido, e atualmente a busca pelo maior rendimento nas caldeiras que queimam a biomassa, bem como melhorias nas turbinas. Anteriormente, as caldeiras possuíam rendimentos de 50-60%, e atualmente chegam a 85 a 90% de eficiência, o que também depende da qualidade da biomassa. Caldeiras que queimam lenha chegam a no máximo 70% de eficiência, e caldeiras a cavaco chegam ao pico de 90% (CARNEIRO et al., 2013).

Ainda assim, caso não haja a cogeração, muita da energia armazenada acaba não sendo aproveitada em função da necessidade de se condensar o vapor expelido pelas turbinas, levando o rendimento global do sistema para baixo. Com a cogeração, no entanto, essa questão é minimizada, uma vez que há a extração do vapor do processo com características adequadas a sua utilização na própria indústria, obtendo-se um rendimento térmico via geração de vapor, o que aumenta a eficiência global do ciclo (FOELKEL, 2016; VIDAL; Da HORA, 2011).

### **Comparação de trabalhos similares na literatura**

Relativamente poucos trabalhos foram encontrados na literatura que realizaram análise de empreendimentos termelétricos utilizando biomassa florestal, principalmente em relação ao cavaco de madeira. A maioria dos trabalhos é diretamente ligada a indústrias do setor, seja por teses ou dissertações elaboradas com dados em parte fornecidos por indústrias, seja de instituições. Alguns resultados são citados abaixo:

- Rodrigues (2009) realizou análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto de cogeração para a indústria Rações Patense, MG, utilizando na queima o cavaco de madeira ou a moinha de carvão vegetal. As principais conclusões do trabalho demonstram não haver viabilidade para a implantação da cogeração diante das condições de mercado daquele período - tarifa de eletricidade e preço de combustível. Caso o preço da energia e o preço do combustível chegassem a um

patamar mais favorável, a hipótese de vender eletricidade para a rede se tornou mais interessante dentre as outras opções testadas. Também se verificou que a moinha de carvão vegetal foi a opção de combustível com maior viabilidade econômica, por ser um resíduo industrial com alto poder calorífico, exigindo, assim, menor consumo de biomassa em relação ao cavaco.

- Seratto (2010) desenvolve um estudo de caso para a Unidade Termelétrica da Usina Santa Terezinha de Paranacity/PR. O trabalho avalia o aumento da produção de energia elétrica e créditos de carbono, suprimindo o déficit do combustível convencional na entressafra – o bagaço de cana – com a biomassa florestal – cavacos de eucalipto. Os resultados indicaram que existe viabilidade econômica se as áreas de cultivo florestal forem localizadas até 117,77 km da Usina, com *payback* de 11,90 anos. Se o raio médio for de 30 km, o projeto pode proporcionar um *payback* de 10,49 anos e o VPL de R\$ 10,49 milhões.

- Em relatório elaborado em 2017 pela Câmara Setorial da Cadeia Produtiva de Florestas Plantadas, (BRASIL, 2017), cujo objetivo principal foi o de ratificar a “Contratação de Energia oriunda de Biomassa de Florestas Plantadas nos Leilões de Energia da ANEEL”, realizaram-se análises do CVU (Custo Variável Unitário) de uma usina termelétrica hipotética a cavaco de eucalipto em função da flexibilidade do despacho. Os resultados demonstraram que quanto maior a flexibilização do despacho, isto é, menor nível de inflexibilidade da usina, maior o custo de produção da biomassa florestal, uma vez que o custo de produção é impactado pela flexibilização dada à colheita, tendo em vista a dificuldade de planejamento e a colheita em idades diferenciadas. Isso afetará o CVU da usina, que será maior se o custo do combustível for maior.

- Em outro relatório, elaborado pelo Instituto Acende Brasil (IAB, 2015), avaliou-se diferentes cenários de utilização de madeira como combustível para a geração de eletricidade, seja via complementação durante os períodos de safra e entressafra do bagaço de cana, ou geração elétrica exclusiva via cavaco de madeira. Os resultados demonstraram que o custo de operação foi mais elevado no cenário de

geração exclusiva via cavaco, em razão do preço de aquisição do cavaco de madeira ser mais elevado frente ao do bagaço.

Os resultados abordados acima demonstram haver significativa influência do preço do combustível (cavaco de madeira) na economicidade dos projetos, além de questões que são específicas a cada projeto, como complementação com outros combustíveis, ou disponibilidade de outros combustíveis mais baratos na região. Desta forma, o dimensionamento de projetos termelétricos utilizando a biomassa florestal deve levar em conta a realidade de cada região e as condições dos mercados de energia e florestal.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Pesquisa bibliográfica**

Para melhor compreender o processo de produção de energia termelétrica utilizando a biomassa florestal, este trabalho realizou ampla pesquisa bibliográfica em artigos científicos, teses, dissertações, relatórios técnicos e demais literaturas sobre o tema. Também foram consultados especialistas do setor de energia para realizar uma análise técnica e econômica de um projeto típico de uma usina termelétrica utilizando biomassa florestal.

### **4.2. Análise técnica – dimensionamento da UTE**

A análise técnica teve como objetivo dimensionar uma usina termelétrica para a microrregião de Viçosa, MG. Para tal, a análise adotou a seguinte metodologia: i) identificou as áreas de plantios florestais de eucalipto nessa região através da pesquisa em diferentes fontes; ii) desenvolveu um projeto típico de uma UTE a cavaco de eucalipto, com base em parâmetros técnicos dessa usina – discutidos com especialistas da área – e parâmetros técnicos florestais referentes ao combustível; iii) realizou avaliação dos cenários de capacidade instalada para essa usina, comparando variáveis de consumo de combustível e área florestal necessária; e iv) desenvolveu análise de sensibilidade para verificar como variações nos parâmetros florestais podem afetar o dimensionamento e as operações dessa usina.

O esquema metodológico da análise técnica encontra-se refletido na Figura 6.

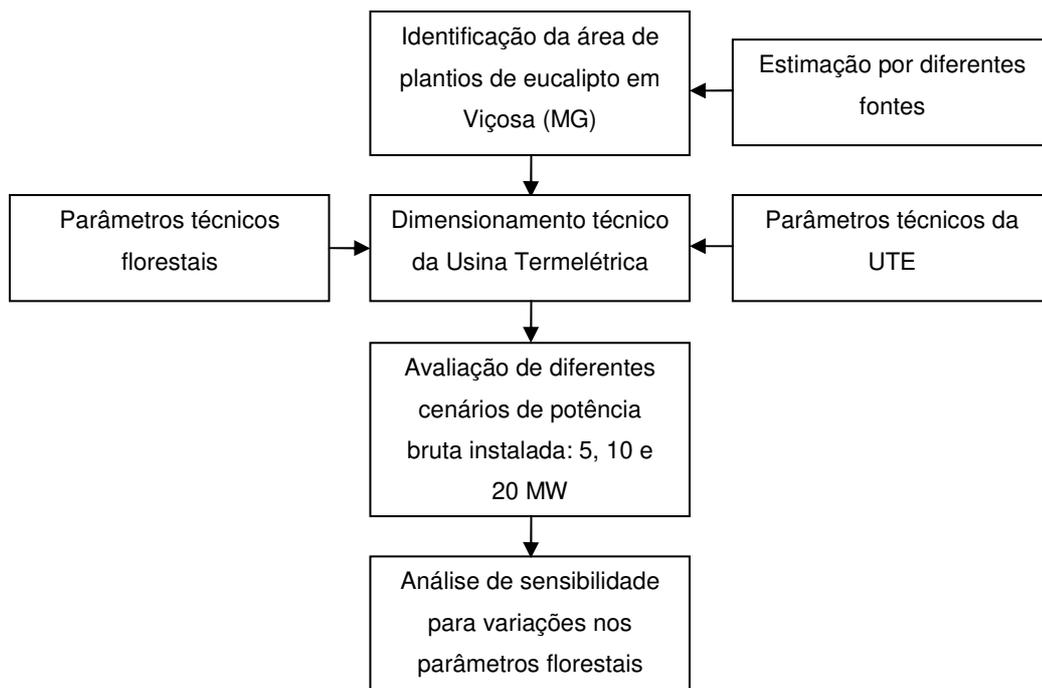


Figura 6: Esquema metodológico da análise técnica.  
Fonte: Elaboração própria.

### 4.3. Identificação da área de plantios florestais na microrregião de Viçosa (MG)

Atualmente o estado de Minas Gerais é o maior produtor florestal do país, com destaque para a produção de eucalipto para os setores de celulose e papel, e das siderúrgicas que utilizam o carvão vegetal em seus processos redutores (IBÁ, 2017; IBGE, 2015).

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) a área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil, ao final de 2016, totalizou 7,84 milhões de hectares, o que corresponde a apenas 0,9% do território brasileiro. Do restante do território nacional, 66,1% estavam cobertos por florestas nativas, 23,3% ocupados por pastagens, 6,2% por agricultura e 3,5% por redes de infraestrutura e áreas urbanas (IBÁ, 2016).

Em relação aos plantios de eucalipto, os dados mostram que 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas no país são provenientes de eucaliptos, o que representa 71,9% do total de plantios florestais. Ressalta-se que tais plantios estão localizados principalmente

nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%).

Dados do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, também mostram que ao final de 2015, cerca de 25% das florestas plantadas do Brasil estavam presentes em Minas Gerais (1,88 milhão de hectares, sendo 98% eucalipto). Os principais consumidores e também produtores de florestas plantadas no estado são o parque metal siderúrgico, a crescente indústria de celulose e, em menor proporção, de painéis de madeira. Essas empresas florestais formaram ao longo dos anos sua própria base de suprimentos de biomassa florestal, sendo detentoras de grande quantidade de terras e florestas (VITAL et al., 2013).

No entanto, nos últimos anos e mais especificamente desde a crise de 2008, os segmentos florestais relacionados à produção de madeira para energia têm sido afetados com a crise das siderúrgicas movidas a carvão vegetal, que fez reduzir a demanda por madeira para carvão vegetal, criando-se uma elevada oferta de plantios. Dessa forma, muitos dos plantios florestais efetivados nessa época, pelos quais uma parte considerável está na região da Zona da Mata Mineira, se encontram sem destinação. Buscar alternativas para a utilização dessa biomassa florestal é de interesse para reativar o mercado florestal da região (MIRANDA et al., 2017; IBÁ, 2016; VALVERDE, et al., 2014).

Portanto, para avaliar a disponibilidade de biomassa florestal na região de Viçosa com o intuito de se abastecer uma possível usina termelétrica a cavaco de eucalipto, foram avaliados três cenários de plantios de eucalipto provenientes das seguintes fontes:

1. Dados da microrregião de Viçosa, oriundos do IBGE;
2. Dados obtidos através de um projeto realizado entre o Polo de Excelência em Florestas, a Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e o SEBRAE, em 2015;
3. Avaliação de plantios em um raio de 50 km de Viçosa;

### **1. Dados da microrregião de Viçosa, oriundos do IBGE**

Em relação especificamente à microrregião de Viçosa (MG), composta por dezenove municípios, os dados do IBGE mostram que a região possuía 33.982 hectares de plantios de eucalipto, ao final de 2015. Embora todos esses plantios não estejam disponíveis, é sabido que uma parte considerável está sem mercado em função da crise das siderúrgicas a carvão vegetal, em Minas Gerais (VALVERDE et al., 2014). Logo, esse maciço florestal pode compor uma oferta de madeira para uma possível termelétrica a cavaco de eucalipto.

## **2. Dados obtidos através de um projeto realizado entre o Polo de Excelência em Florestas, a Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e o SEBRAE, em 2015**

Esses dados fazem referência a um projeto que ocorreu entre 2015 e 2016, e que tinha como objetivo avaliar propostas de possíveis geradoras termelétricas na região de Viçosa utilizando parte da oferta de madeira disponível na região. Foram convidados a participar das discussões diversos produtores florestais, técnicos, consultores, professores da UFV, alguns alunos de pós-graduação e empresas interessadas em construir uma usina termelétrica a cavaco de eucalipto.

O levantamento de plantios de eucalipto desse projeto chegou a um maciço florestal de 30.657 hectares provenientes de cidades próximas a Viçosa, compostos por produtores florestais individuais e algumas empresas, dados de final de 2015. Também foram incluídas áreas da microrregião de Juiz de Fora (MG), que não se localiza tão próxima a Viçosa e que poderia onerar o projeto em função do custo de deslocamento dessa madeira.

## **3. Avaliação de plantios em um raio de 50 km de Viçosa**

Para não estar restrito a microrregião de Viçosa, este trabalho também buscou levantar plantios de cidades localizadas a um raio de 50 km do centro de Viçosa. O raio foi traçado através do recurso online FreeMapTools<sup>14</sup>, que é um recurso online gratuito aliado ao programa

---

<sup>14</sup> Website - <https://www.freemaptools.com>.



Com relação a estes três cenários, foram traçadas algumas considerações, listadas a seguir: i) embora com diferentes números de cidades, o tamanho das áreas de eucalipto dos três cenários é bastante similar, variando de cerca de 30 mil a no máximo 34 mil hectares de plantios, com média de 32.418 hectares; ii) o raio de 50 km engloba partes da área de municípios que foram considerados com sua área total de eucalipto, bem como partes de municípios que não foram consideradas no estudo; iii) embora exista um significativo maciço florestal disponível no mercado, é sabido que uma parte dessas áreas também já possui destinação, seja por pertencer a empresas, ou de produtores fomentados; iv) foram considerados somente plantios de eucalipto e não de pinus ou outras espécies, uma vez que o eucalipto é responsável por quase a totalidade dos plantios dessa região.

De posse destes dados, para a simulação do dimensionamento do potencial de produção elétrica da usina, este trabalho utilizou como referência a média das áreas de plantios das três fontes de dados, ou seja, 32.418 hectares, uma vez que esse valor pode ser considerado representativo para a microrregião de Viçosa.

#### **4.4. Premissas para o desenvolvimento do projeto típico de geração termelétrica**

Para o dimensionamento da usina, foi considerada a instalação de um projeto típico de uma usina termelétrica a cavaco de eucalipto no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, com início de construção previsto para janeiro de 2018, e operação prevista para janeiro de 2020<sup>15</sup>. Tendo como base a revisão da literatura e o entendimento com técnicos e empresas do ramo, as principais características, em termos gerais, desse projeto são:

- Dimensionamento de uma usina termelétrica que consome exclusivamente cavaco de eucalipto para geração de eletricidade;

---

<sup>15</sup> Por ser um estudo de caso hipotético, os dados foram rodados no modelo ANAFIN e planejados para antes da data de defesa de Mestrado deste projeto.

- A usina utilizará a tecnologia de ciclo a vapor – Rankine, considerada uma tecnologia já conhecida e a mais utilizada no Brasil, conforme já discutido na revisão de literatura;

- A usina não será detentora dos plantios florestais, e sim possuirá contratos de longo prazo com produtores florestais para fornecimento da madeira;

- A usina também não possuirá um picador de cavacos, a princípio, e comprará os cavacos de terceiros ou de produtores que possuem picador;

- A UTE pode vir a adquirir madeira de terceiros (fora dos contratos com produtores) para estoque de garantia.

Todos estes pontos são de relevância para a análise econômica, dado que a usina poderá ter seus custos reduzidos ao não ser proprietária da terra, e também não ter que comprar um picador de cavacos, reduzindo seus custos de investimento inicial.

Estas decisões dependem basicamente do perfil do investidor do empreendimento. Por exemplo, casos em que os investidores preferem ser proprietário dos plantios normalmente ocorrem quando estes já possuem terras com plantios florestais, ou possuem alguma indústria relacionada que gere excedente de madeira ou resíduos, bem como investidores com perfil relacionado a terra, e que assim, preferem ser proprietários dos ativos florestais. Nestes casos, os investidores possivelmente irão desenvolver o projeto termelétrico com base em seus ativos, o que terá efeito contábil direto com a contabilização dos ativos florestais no Ativo Imobilizado.

Por outro lado, investidores que não possuem perfil ligado a ativos florestais ou *commodities* agrícolas, possivelmente irão desenvolver seus projetos com base na compra permanente do combustível e na negociação direta com fornecedores de cavaco ou de madeira.

#### **4.5. Estimativa de energia termelétrica gerada**

Para estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada por uma usina termelétrica, tendo como referência a média da área de

plantios florestais da microrregião de Viçosa (32.418 hectares de eucalipto), foram avaliados três cenários de potencial bruto de geração elétrica para essa UTE: cinco, dez e vinte megawatts (MW) de potência.

A justificativa para a determinação destes três cenários se baseia nos seguintes termos: i) para a potência de cinco MW, a UTE pode se enquadrar na minigeração distribuída, que contempla empreendimentos entre 0,075 MW a 5 MW de capacidade instalada, onde através do uso de uma fonte renovável (cavaco de eucalipto), a usina pode gerar energia elétrica conectada na rede de distribuição, sem ter que investir em sistemas de transmissão e distribuição e com minimização de perdas, conforme a Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL (ANEEL, 2015); ii) para a potência bruta de 10 MW, entende-se que é um projeto típico de biomassa que, embora não se enquadre na minigeração distribuída, fica próximo a média da potência das usinas termelétricas de resíduos florestais em operação atualmente, de cerca de 7 a 8 MW, conforme dados do Banco de Informações de Geração, da ANEEL; iii) para a potência de 20 MW, entende-se como um projeto maior, com necessidade de maiores investimentos iniciais, e portanto, que vale a pena ser simulado.

Para a avaliação dos três cenários de potência elétrica instalada, cada potência foi denominada de uma usina hipotética diferente, embora seja válido ressaltar que o objetivo deste dimensionamento não é simular a instalação de várias usinas ao mesmo tempo, somente comparar os diferentes tipos de projeto, capacidade e consumo de madeira que se pode obter tendo em vista um maciço florestal existente.

Portanto, a seguinte denominação foi adotada:

- i) UTE A: 5 MW de potência bruta instalada;
- ii) UTE B: 10 MW de potência bruta instalada;
- iii) UTE C: 20 MW de potência bruta instalada;

Cada potencial bruto de geração elétrica retornou uma quantidade de consumo de cavaco, e este consumo foi quantificado em área florestal (hectares) que foi comparada à área média de plantios da região, onde se buscou analisar sua viabilidade e suas potencialidades.

Além disso, foi realizada análise de sensibilidade dos coeficientes de consumo da usina com relação a variações nos principais parâmetros florestais: teor de umidade, densidade básica e Incremento Médio Anual (IMA).

Abaixo as premissas consideradas para o cálculo de conversão de biomassa florestal em energia termelétrica, em um projeto típico de uma termelétrica a biomassa florestal:

**a) Propriedades da madeira e estimativas:** para determinar a massa seca de madeira por hectare e a energia disponível por hectare, foi necessário determinar a densidade básica e a densidade a granel da madeira, o teor de umidade e o Incremento Médio Anual (IMA). Para tal, foram selecionadas amostras de cavaco de eucalipto provenientes da região de Viçosa, obtidas por meio do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Para a determinação da densidade básica, densidade a granel e teor de umidade, foram seguidos os procedimentos previstos nas normas europeias DIN EN 15103 (2010) e DIN EN 14961-4 (2011)<sup>16</sup>, seguindo os critérios de secagem e métodos de pesagem e determinação de volume. Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades e umidade das respectivas amostras. A equação de densidade é apresentada abaixo.

$$Db = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

Db = Densidade básica;

m = massa em kg;

v = volume em m<sup>3</sup>.

Na determinação da densidade a granel, pela qual são considerados os espaços vazios junto às peças de madeira, foram utilizadas duas

---

<sup>16</sup> A norma DIN EN 15103, de 2010, determina os padrões para medição da densidade básica da madeira, e a norma DIN EN 14961-4, de 2011, traz as especificações do uso do cavaco de madeira para energia.

caixas de amostras de cavaco úmido de eucalipto, que foram inseridas separadamente em uma caixa de volume igual a 2.511,6 cm<sup>3</sup> e pesadas em balança (posteriormente os dados foram convertidos para kg/m<sup>3</sup>).

Para a densidade básica, foram utilizadas 15 amostras de cavaco, com medição individualizada de volume saturado e massa absolutamente seca pelo método de imersão em água e utilizando-se balança hidrostática. Todas as medições foram realizadas no LAPEM/UFV.

Para o cálculo da energia disponível por hectare/ano, multiplicou-se a biomassa de cavaco seco pelo poder calorífico superior, e fez-se a equivalência de 10<sup>-6</sup> GWh a 859,85 kcal, conforme a equação a seguir:

$$\text{Energia Disponível} = \text{MSM} \times \text{PCS} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

Energia Disponível = energia por hectare ano (GWh/ha.ano);

MSM = massa seca de cavaco (ton/ha.ano);

PCS = poder calorífico superior da madeira (kcal/kg).

Considerou-se uma produtividade florestal média de 35 m<sup>3</sup>/ha.ano, e idade de corte de sete anos. Conforme Silva (2011), esses são valores bastante comuns para os plantios de eucalipto da região da Zona da Mata mineira (SILVA, 2011).

O poder calorífico superior (PCS) do cavaco de eucalipto foi de 4.510 kcal/kg, que foi obtido do banco de dados de amostras do LAPEM/UFV. Em função da influência da umidade no poder calorífico da biomassa florestal, utilizou-se a seguinte expressão para cálculo do poder calorífico útil (PCU).

$$\text{PCU} = [\text{PCI} * (1 - U)] - 600 * U \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

PCU = Poder Calorífico Útil;

PCI = Poder Calorífico Inferior a 0 de umidade (PCI = PCS - 324);

U = Teor de Umidade em base úmida (%).

**b) Características do sistema de conversão:** a partir das características do sistema de conversão termelétrico utilizado (ciclo a vapor – Rankine), foram calculados os coeficientes de consumo de vapor e a quantidade de combustível necessário para geração da energia, de acordo com os coeficientes da equação de Hugot (1976), citado por Nascimento (2007), que relaciona quantidade de vapor, entalpia do vapor e da água, rendimento da caldeira e PCU (HUGOT, 1976; NASCIMENTO, 2007).

$$Q_c = \frac{Q_v(h_v - h_a)}{\eta(\text{PCU})} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

$Q_c$  = quantidade de combustível (kg)

$Q_v$  = quantidade de vapor (kg)

$h_v$  = entalpia do vapor em função da pressão e temperatura (kcal/kg)

$h_a$  = entalpia da água em função da temperatura (kcal/kg)

$\eta$  = rendimento da caldeira (%)

PCU = Poder Calorífico Útil (kcal/kg)

**c) Principais parâmetros técnicos da UTE:** os parâmetros técnicos específicos da usina termelétrica foram obtidos junto à empresa ICAVI – Indústria de Caldeiras Vale do Itajaí S/A, que auxiliou na discussão do dimensionamento deste estudo de caso. A ICAVI é uma empresa situada no município de Pouso Redondo (SC), que produz equipamentos no ramo de caldeiras e acessórios para centrais térmicas e termelétricas, e também auxilia no desenvolvimento dos projetos. Os seguintes dados foram utilizados para cada projeto:

- A pressão de vapor utilizada da caldeira foi de 45 bar para o projeto de 5 MW, e 70 bar para os projetos de 10 e 20 MW. A escolha da menor pressão de vapor para o projeto de 5 MW tem a ver com o custo, dado que uma usina de 5 MW de potência é considerada como um projeto de menor escala. Já a pressão de 70 bar leva a maior eficiência de geração

e por isso, tem maior custo do que a de 45 bar, que por sua vez, é menos eficiente.

- O valor da entalpia do vapor superaquecido utilizado nos cálculos foi de 811,86 kcal/kg e a entalpia da água de 105,00 kcal/kg (delta = 706,86 kcal/kg). Estes valores podem variar conforme a pressão e temperatura de trabalho da caldeira. Mas para fins de dimensionamento técnico e consumo, foram considerados constantes para todos os projetos.

- Para cada potencial bruto de geração elétrica, foi considerada uma capacidade de caldeira, em toneladas de vapor por hora, e o rendimento apresentado pela caldeira na conversão de energia foi considerado em 85% em média, para o projeto de 10 MW, 5% menor para o projeto de 5 MW (80,75%), e 5% maior para o projeto de 20 MW (89,25%). Estes coeficientes de rendimento foram estipulados de maneira diferente para cada projeto em razão das diferentes capacidades e escalas de cada um, conforme comentado na revisão de literatura quando citado Foelkel (2016), e também após conversas com especialistas da área.

- No sistema de conversão caldeira-turbina foi considerado que para se gerar um megawatt-hora (MWh), necessita-se de 4.500 kg vapor/hora. Ou seja, uma sistema com vazão de vapor de 80.000,00 kg/hora consegue produzir 17,78 MWh, conforme expressão a seguir:

$$E = \frac{V. \text{vapor}}{4.500} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

E = energia elétrica a ser gerada, em megawatt-hora;

V. vapor = vazão de vapor, em kg/h

**d) Equivalência em abastecimento elétrico residencial:** para avaliar o quanto a energia gerada pode abastecer em termos de distribuição residencial, foi considerado que o consumo médio residencial da região é de 160 kWh/mês, conforme dados da Resenha Mensal de Energia Elétrica da EPE, referente ao Sudeste para dezembro de 2016 (EPE, 2016c). Ressalta-se que a estimativa de atendimento residencial é

apenas um parâmetro para avaliar o potencial energético da usina, uma vez que a energia gerada e inserida no sistema é enviada para diversos consumidores, sendo gerenciado pelo operador do sistema, o ONS. Além disso, também há perdas na distribuição e transmissão. A Tabela 8 resume os parâmetros adotados no estudo de caso.

Tabela 8: Premissas técnicas e florestais

<b>Dados UTE</b>	<b>Unidade</b>	<b>UTE A</b>	<b>UTE B</b>	<b>UTE C</b>
Capacidade instalada	MW	5	10	20
Produção de vapor	Ton/h	*	*	*
Pressão de trabalho	Bar	45	70	70
Delta Entalpia	Kcal/kg	706,86	706,86	706,86
Regime de trabalho	h/ano	8.322	8.322	8.322
Eficiência caldeira	%	80,75	85,00	89,25
<b>Dados Florestais</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor único para todos os projetos</b>		
Idade de Corte (IC)	anos	7		
IMA	m <sup>3</sup> /ha.ano	35		
PCS eucalipto	Kcal/kg	4.510		

Fonte: Elaboração própria com base em dados da ICAVI e SILVA (2011). \* A capacidade de produção de vapor dependerá do potencial bruto de energia elétrica a ser instalado.

#### 4.6. Potencial de geração de empregos

Com base na área florestal estimada para abastecimento de cada projeto, foi avaliado o impacto social de cada projeto através dos empregos que poderão ser gerados com o aproveitamento das respectivas áreas de florestas plantadas para a geração de energia, seja no campo ou nas áreas diretamente relacionadas.

A estimativa seguiu metodologia adotada por Miranda (2015), que estimou a proporção de empregos que podem ser gerados em uma determinada porção de área florestal com base no anuário da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), de 2017.

Conforme dados do anuário 2017 do IBÁ, o setor florestal brasileiro possui 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, empregando diretamente 510 mil pessoas, o que dá uma proporção de 6,51 empregos diretos para 100 hectares de plantios florestais. Estes dados já contemplam postos diretamente gerados nas indústrias de base florestal,

como as de papel e celulose, madeireira, siderúrgicas e algumas de energia. Logo, a proporção é maior do que em alguns estudos que mostram que apenas a silvicultura (produção de mudas, preparo da terra, plantio e tratos culturais) gera um emprego para cada 100 hectares (CALIXTO et al., 2009; VALVERDE; RENTE; VALVERDE, 2014).

Ainda seguindo os dados do anuário 2017 do IBÁ, estima-se que o número total de postos de trabalho da atividade florestal, considerando empregos diretos, indiretos e resultantes do efeito renda, seja de 3,7 milhões, o que dá aproximadamente 0,47 postos totais para cada um hectare de plantios, ou 47 postos para cada 100 hectares.

Portanto, de forma proporcional, este trabalho estimou o número de empregos que podem ser gerados (diretos e postos totais) a partir das áreas florestais demandadas por cada projeto (5, 10 e 20 MW).

#### **4.7. Análise da viabilidade econômica da UTE em diferentes cenários de contratação de energia**

O objetivo dessa análise foi avaliar a viabilidade econômica de uma usina termelétrica movida a biomassa florestal (cavacos de eucalipto) na microrregião de Viçosa (MG). Para este estudo de caso hipotético, considerou-se que a usina teve construção iniciada em janeiro de 2018, com início de operação em janeiro de 2020, e atuará no subsistema Sudeste/Centro-Oeste.

Identificou-se a necessidade de se avaliar diferentes cenários de contratação dessa usina a partir dos dois mercados existentes no setor elétrico atual: ACR – mercado regulado e ACL – mercado livre.

A metodologia utilizada foi baseada na abordagem metodológica desenvolvida por Marzano et al., (2007), conforme Figura 8, na qual foi realizado estudo de viabilidade econômico-financeira de uma usina termelétrica a gás natural atuando em diferentes cenários de contratação.

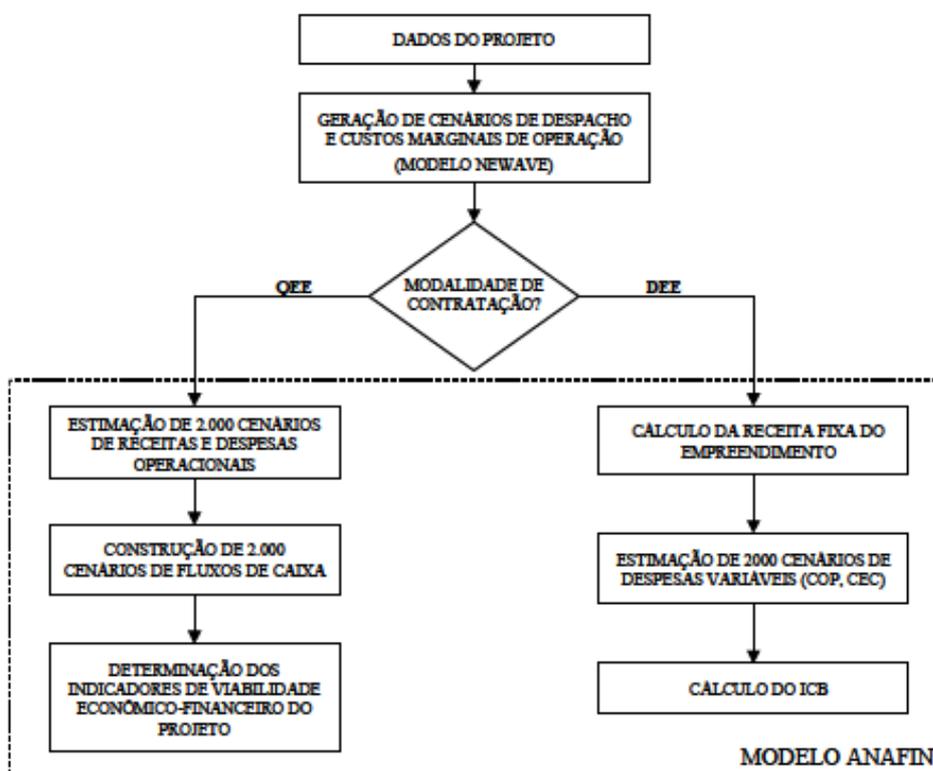


Figura 8: Esquema metodológico da análise econômica.  
Fonte: Marzano et al. (2007)

O passo a passo da metodologia está descrito abaixo.

1) Primeiramente, com o apoio do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), vinculado às empresas Eletrobras, foram utilizados dois programas (ou modelos):

- o NEWAVE, que realizou a simulação da operação energética do sistema através da geração de 2.000 cenários de evolução de despacho, bem como dos custos marginais de operação (CMOs) do sistema. Para essa simulação, foi utilizado como base o Plano Decenal de Expansão da Energia Elétrica 2024 (PDE 2024);

- modelo ANAFIN, utilizado para a análise de viabilidade econômica do projeto de geração termelétrica. Com o ANAFIN, foram estimados os fluxos de caixa futuros do projeto em diferentes cenários de despacho e considerando as variáveis do projeto e os riscos associados (BATISTA et al., 2016; MARZANO et al., 2007).

Assim, o NEWAVE gerou resultados associados ao sistema elétrico (cenários de despacho e CMO) e o ANAFIN foi responsável por gerar os

fluxos de caixa da UTE e por realizar a análise financeira, a partir de uma análise determinística e de risco.

No modelo ANAFIN, a análise determinística é realizada por meio da análise de fluxo de caixa com base em valores representativos das variáveis do estudo, levando a determinação de um conjunto de indicadores de viabilidade associados ao projeto. Os principais indicadores utilizados nessa análise foram: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR); Preço de Equilíbrio (PEQ) e Taxa de Juros de Equilíbrio (TJEQ). Para trabalhar com as incertezas associadas às variáveis do projeto, o módulo determinístico do ANAFIN realiza análises de sensibilidade e análises de cenário destas variáveis (CEPEL, 2017).

A análise de risco realizada pelo modelo ANAFIN utiliza técnicas estatísticas de simulação, como a Simulação de Monte Carlo. Assim, são obtidos indicadores probabilísticos relacionados à viabilidade econômica do projeto, tais como a média da distribuição dos VPLs e das TIRs (CEPEL, 2017).

2) Dentre os principais dados necessários para a avaliação desse tipo de projeto, foram estipulados: i) cronograma físico-financeiro das despesas de investimento – *capex*; ii) estrutura da captação de recursos (parte própria e parte financiada); iii) condições do financiamento obtido (taxa de juros, amortização, período de carência, tempo de financiamento, etc.); iv) características técnicas do projeto (características do combustível tais como poder calorífico, preço da *commodity*, sistema de conversão termelétrico, vida útil do projeto, etc.); v) parâmetros de comercialização de energia (quantidade de energia contratada, preço de venda, modelo de contratação, etc.). Além desses, outros pontos foram estimados, como custos de Operação e Manutenção – O&M (*opex*) e outras condições contratuais, tais como o índice do leilão, entre outras. Importante ressaltar que todos esses dados foram estipulados com base em pesquisas na literatura, dados obtidos de consultorias, com o próprio CEPEL e via

análise dos dados divulgados pela CCEE dos empreendimentos a biomassa que ganharam nos leilões<sup>17</sup>.

Alguns dados operacionais foram levantados junto a especialistas da área. A Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (TEIF) é o percentual do tempo em que a usina não está apta a operar, devido a ocorrência de falha ou interrupção de emergência em condições não programadas. Essa taxa foi estipulada em 1,50% para este projeto. E a Indisponibilidade Programada (IP) é o percentual do tempo em que a usina não está apta a operar, devido à execução de manutenção programada. A IP estipulada foi de 3,50%. São valores comuns a projetos deste tipo.

3) Os indicadores financeiros que foram utilizados nessa análise de viabilidade são os usualmente empregados para esses tipos de projetos: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), e o Índice Custo Benefício (ICB).

O Valor Presente Líquido (VPL) é a fórmula matemático-financeira usada para determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma determinada taxa de juros, menos o custo do investimento inicial (OLIVEIRA; MACEDO, 1996). Conforme Lima Junior (1995), um projeto será economicamente viável se o seu VPL for positivo a uma determinada taxa de desconto, ou seja, o valor descontado das receitas futuras é superior ao valor do investimento. Quanto maior o VPL, mais economicamente atrativo será o projeto, em contrapartida, será economicamente inviável se o seu VPL for negativo. Portanto, matematicamente o VPL é a soma do valor presente das receitas menos a soma do valor presente dos custos (DAVIS; JOHNSON, 1987). A equação é expressa por:

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1 + i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1 + i)^{-j} \quad (\text{Eq. 6})$$

---

<sup>17</sup> A CCEE divulga mensalmente planilha de dados com o resultado consolidado dos leilões de energia. Alguns dados financeiros, como preço do leilão, receita e custo do projeto são divulgados e atualizados nesta planilha.

Onde:

$i$  = taxa de juros;

$C_j$  = custo no final do ano  $j$ ;

$R_j$  = receita no final do ano  $j$ ; e,

$n$  = duração do projeto em anos.

A TIR é a taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas ao valor presente dos custos, ou seja, iguala o VPL a zero (REZENDE; OLIVEIRA, 2001). Também pode ser entendida como a taxa percentual do retorno do capital investido. A equação é expressa por:

$$\sum_{j=0}^n R_j (1 + \text{TIR})^{-j} = \sum_{j=0}^n C_j (1 + \text{TIR})^{-j} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$C_j$  = custo no final do ano  $j$ ;

$R_j$  = receita no final do ano  $j$ ; e,

$n$  = duração do projeto em anos.

Importante ressaltar que a receita de venda de energia da usina termelétrica dependerá da modalidade de contratação de energia elétrica de acordo com os ambientes de contratação (ACL e ACR), e do nível de inflexibilidade adotado. Dessa forma, a avaliação da atratividade econômica desse projeto típico de geração termelétrica está relacionada à estratégia de contratação adotada pelo investidor (MARZANO et al., 2007). Abaixo são apresentadas as formas de cálculo dessas receitas de acordo com as modalidades de contratação:

#### **a) Receita via Ambiente de Contratação Livre**

Neste modelo de contratação é feito um acordo entre a usina geradora e o consumidor, no qual a usina se compromete a entregar um volume estipulado de energia durante um período e uma tarifa pré-determinados. Nesse acordo, portanto, volume, período e tarifa são

especificados no contrato, o que garante ao gerador um fluxo já determinístico de receita.

Por outro lado, o gerador estará sempre sujeito a comercializar energia no mercado de curto prazo (mercado *spot*), onde são comercializadas as diferenças entre os volumes gerados e contratados de energia. Conforme expõem Marzano et al. (2007):

Por exemplo, se um gerador possui um contrato bilateral no qual se compromete a entregar 1.000 MWh, e este não é despachado pelo ONS, este é obrigado a adquirir os 1.000 MWh no mercado à vista, de modo a poder honrar o contrato. Por outro lado, se é despachado em 1.500 MWh, os 500 MWh adicionais são vendidos no mercado à vista (MARZANO et al., 2007).

Portanto, a receita de venda da usina geradora no instante  $t$  pode ser determinada pela equação a seguir:

$$R_t = px + \pi_t(G_t - x) \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

$G_t$  = despacho do gerador no instante de tempo  $t$ ;

$\pi_t$  = preço da energia no mercado *spot* no instante de tempo  $t$ ;

$x$  = volume de energia estabelecido no contrato bilateral que deverá ser entregue no instante de tempo  $t$ ;

$p$  = preço da energia definido no contrato.

Importante observar que o preço da energia no mercado *spot* varia em função da demanda de energia do SIN, do volume dos reservatórios, aflúências, etc., sendo, portanto, uma variável aleatória. Dessa maneira, seu preço é calculado com base no Custo Marginal de Operação (CMO), refletindo um aumento marginal da demanda de energia do sistema através do acréscimo no valor esperado do custo de operação do sistema ao longo de todo o horizonte de planejamento. Ressalta-se que estes dados de CMOs futuros foram gerados via o modelo NEWAVE.

## **b) Receita via Ambiente de Contratação Regulada por contrato de Disponibilidade**

Nesse ambiente, as termelétricas contratadas nos leilões de energia recebem uma Receita Fixa (RF), destinada à remuneração dos custos fixos do empreendimento, inclusive os custos fixos de operação e dos investimentos. A RF somente não cobre os custos fixos incorridos quando a usina é despachada acima da inflexibilidade.

A inflexibilidade de uma usina termelétrica (ou parcela inflexível da usina) é o montante de potência mínima que deve ser obrigatoriamente despendido pela mesma, e que não está sujeito à regra de despacho do ONS. Nestes casos, a usina deve declarar à EPE, no cadastramento para o leilão, a proporção de sua potência que é inflexível (geração mínima), cobrando os gastos relativos à inflexibilidade na sua Receita Fixa anual (EPE, 2014, 2015).

Por exemplo, se uma usina de 10 MW de potência declara a EPE que a sua inflexibilidade é de 20%, isso quer dizer que a usina reservou 20% de um ano operacional em que ela deverá ser obrigatoriamente despachada pelo ONS, independentemente da ordem de mérito vigente e em sua potência total. Atualmente, o nível máximo permitido é de 50% de inflexibilidade (menor ou igual a 50%), sendo que no último edital dos leilões de energia nova que ocorreram em dezembro de 2017, do tipo A-4 e A-6, ficou facultado ao empreendimento termelétrico declarar quais meses do ano irá gerar, ou seja, apresentar valores mensais de inflexibilidade sazonal (EPE, 2017).

Essa inflexibilidade operativa pode ser oriunda tanto de razões tecnológicas (usinas nucleares que exigem uma carga mínima de potência para seu funcionamento adequado) ou por motivos econômicos (usinas a gás natural que possuem contratos de fornecimento do tipo “*take or pay*”<sup>18</sup>, sendo inviável mantê-las desligadas).

Nos contratos por Disponibilidade do ambiente regulado, as usinas são pagas até a sua inflexibilidade. Ou seja, o empreendimento termelétrico recebe sua receita de modo a sustentar a sua disponibilidade

---

<sup>18</sup> Cláusulas de consumo mínimo de combustível, bastante comuns em contratos de energia para termelétricas (principalmente gás natural).

parcial ou total da energia a ser ofertada, representada pela sua Garantia Física habilitada em leilão. Essa receita representa um aluguel de suas instalações e sua capacidade de despachar. Quando a usina é chamada a despachar, os custos variáveis e eventuais exposições financeiras no mercado a vista são repassados ao comprador da energia gerada, de modo que a UTE não fica exposta a variações de preços no mercado livre, e tem assegurado uma receita fixa anual que viabiliza o retorno do empreendimento independentemente da operação da usina (MARZANO et al., 2007; SERATTO, 2010).

De acordo com EPE (2015), a receita fixa (RF) pode ser decomposta em duas rubricas: i) a parcela vinculada ao custo do combustível na geração inflexível  $RF_{comb}$  em R\$/ano; e ii) a parcela vinculada aos demais itens  $RF_{demais}$  em R\$/ano.

Assim, tem-se a equação:

$$RF = RF_{comb} + RF_{demais} \quad (\text{Eq. 9})$$

Ainda segundo EPE (2015), é importante destacar dois casos na análise da receita fixa:

i) Se a usina tiver inflexibilidade operativa zero, terá a parcela da sua Receita Fixa vinculada ao custo do combustível,  $RF_{comb}$ , sendo nula. Nesse caso, portanto, a usina será despachada quando o Custo Marginal de Operação (CMO) for maior ou igual ao seu Custo Variável Unitário (CVU), ou por razões de restrições elétricas, mas sempre por solicitação do ONS.

Ou seja: se  $CMO \geq CVU$  = a usina estará despachada no limite de sua disponibilidade.

ii) Se a inflexibilidade for diferente de zero, o empreendimento será despachado, no mínimo, em sua inflexibilidade, independentemente da relação entre os valores do CMO e do CVU. Nesse caso, a  $RF_{comb}$  será não nula, calculada por:

$$RF_{\text{comb}} = 8.760 \times P_{\text{inflex}} \times i \times P \times e \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

$RF_{\text{comb}}$  = parcela da receita fixa vinculada ao custo do combustível na geração inflexível, em R\$/ano;

8760 = número de horas por ano, considerando 365 dias e 24 horas de trabalho;

$P_{\text{inflex}}$  = é a parcela inflexível da energia, em MW, vendida no leilão, obtida pela multiplicação da razão entre a energia contratada no leilão (EC) e a garantia física (GF) pela inflexibilidade declarada pela usina na Ficha de Dados do empreendimento (Inflex);

$i$  = fator de conversão declarado pela usina na Ficha de Dados;

$P$  = o preço médio de referência utilizado na geração inflexível;

$e$  = taxa de câmbio da venda do dólar nos Estados Unidos da América, divulgada pelo Banco Central (BACEN), correspondente ao mês anterior ao da Portaria que define as diretrizes do leilão que a usina participará.

Importante ressaltar que todas as variáveis devem ter como referência o mês anterior ao da Portaria que define as diretrizes do leilão em que participará.

Para o cálculo do Índice de Custo Benefício (ICB), deve-se determinar o valor esperado do custo total do empreendimento de geração termelétrica para o consumidor. Esse custo total é compreendido pelos custos de investimento, onde são incluídos os custos socioambientais, os juros durante a construção e a parcela fixa dos custos de operação e manutenção (O&M), somado ao valor esperado do custo de operação (COP), e ao valor esperado do custo econômico de curto prazo (CEC).

O ICB (R\$/MWh), pode ser definido como a razão entre o custo total e o benefício energético de um empreendimento de geração. Pode ser calculado com base mensal ou anual, conforme a equação:

$$ICB = \frac{\text{Custos Fixos} + E(\text{Custo de Operação}) + E(\text{CustoEcon. CurtoPrazo})}{\text{Garantia Física}} \quad (\text{Eq. 11})$$

O índice ICB pode ser reinterpretado para a seguinte equação, que considera uma usina que participa dos dois ambientes (ACL e ACR):

$$ICB = \frac{RF}{8760 \times QL} + \frac{COP + CEC}{8760 \times GF} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

RF = Receita Fixa requerida pelo empreendedor, relativa à quantidade de lotes (QL) ofertada para o ACR, em R\$/ano;  
 QL = Quantidade de Lotes ofertada para o ACR limitada à Garantia Física.

Assim, o ICB serve como uma estimativa de quanto irá custar a energia para o agente distribuidor (comprador) durante o prazo de vigência do contrato na modalidade Disponibilidade de Energia (EPE, 2015).

E as variáveis COP e CEC são descritas pelas expressões a seguir:

$$COP_{c,m} = CVU \times (Gera_{c,m} - Inflex_m) \times nhoras_m \quad (\text{Eq. 12})$$

$$CEC_{c,m} = CMO_{s,c,m} \times (GF - G_{eram}) \times nhoras_m \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

CVU = Custo variável unitário da usina termelétrica (R\$/MWh);  
 Gera<sub>c,m</sub> = Geração da UTE no mês m, cenário hidrológico c (MW médios);  
 Inflex<sub>m</sub> = Nível de inflexibilidade de despacho da UTE no mês m (MW médios);  
 GF = Garantia física da UTE (MW médios);  
 CMO<sub>s,c,m</sub> = Valor do Custo Marginal de Operação limitado ao PLD mínimo e ao PLD máximo, vigentes no ano do leilão;

$N_{\text{horas}_m}$  = Número de horas no mês m.

Também foi calculado o Preço de Equilíbrio (PEQ), que representa o preço de energia contratada cujo fluxo de caixa associado, quando descontado pelo custo de capital, produz um VPL nulo. O PEQ (R\$/MWh) corresponde ao valor do preço mínimo que remunera o capital dos agentes, para aquele empreendimento, ou seja, o menor preço que o empreendedor pode ofertar no leilão sem ter prejuízo.

4) Para avaliar a operação de uma usina termelétrica, deve-se observar que ela somente irá operar no mercado regulado se o Custo Marginal de Operação (CMO) estiver acima de seu custo de operação (CVU). Dessa maneira, a operação de um empreendimento termelétrico pode ser considerada como uma opção, e não uma obrigação, o que pode agregar valor ao projeto (MARZANO et al., 2007).

Assim sendo, este trabalho realizou algumas análises de sensibilidade para verificar a influência de variáveis econômicas sob a economicidade do projeto, isto é, sob os indicadores VPL e TIR. As principais variáveis analisadas foram Preço da Energia Contratada, Preço do Combustível, Investimentos, O&M e Custo do Capital Próprio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Dimensionamento do projeto da usina termelétrica

Com relação à determinação dos parâmetros florestais, foram encontrados os seguintes resultados: o teor de umidade médio encontrado nas amostras de cavaco foi de cerca de 30%<sup>19</sup>. Na determinação da densidade a granel, as duas amostras obtiveram densidade a granel média de 272,91 kg/m<sup>3</sup> (massa úmida de 685,44 gramas dividida pelo volume da caixa de 2.511,6 cm<sup>3</sup>, multiplicado por 1.000 para equivalência em kg/m<sup>3</sup>, conforme explicitado na seção de Materiais e Métodos).

Em relação à densidade básica, a média das massas secas das amostras de cavaco foi 0,82 gramas e a média dos volumes saturados de 1,59 cm<sup>3</sup>. A densidade básica média foi de 518,15 kg/m<sup>3</sup> (calculada em g/cm<sup>3</sup> e feita a equivalência). Estes valores encontrados podem ser considerados bastante comuns para a região, conforme apontado em Carneiro et al. (2014).

Com estes valores, foram obtidos os dados de massa seca de cavaco e energia disponível por hectare ano. Os resultados foram de 18.135,10 kg/ha.ano e 95,12 GWh/ha.ano, respectivamente. Os dados obtidos se encontram na Tabela 9.

Tabela 9: Estimativas de densidade básica, massa seca e energia.

Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa seca cavaco (kg/ha.ano)	Energia disponível/ha.ano		
		Gcal	kWh	GWh
518,15	18.135,10	81,79	95.120,45	95,12

Fonte: Resultados da pesquisa.

Para o dimensionamento da usina termelétrica, os seguintes resultados foram obtidos: com relação a UTE A, para uma potência elétrica desejada de 5 MW, é necessária a utilização de uma caldeira com 26,25 toneladas/hora de produção de vapor, a uma pressão de trabalho

<sup>19</sup> O valor médio foi arredondado para 30% com o intuito de facilitar as conversões.

de 45 bar. Isso representa uma capacidade de produção elétrica de 5,83 MWh, com um consumo de 7.977,3 kg de cavaco/hora, ou 1.367,5 kg de cavaco/MWh. Em volume, esse consumo representa 5,01 m<sup>3</sup>/MWh.

Considerando esse consumo de cavaco em uma base anual, ou seja, um regime de trabalho de 8.322 horas/ano, isso representa um consumo anual de 66.387,03 toneladas de cavaco úmido. Tendo por base o IMA e a densidade básica, esse consumo anual equivale a uma área florestal necessária para a vida útil do projeto de 2.815,9 hectares (ou 402,3 hectares/ano). Essa área representa apenas 8,7% da área média considerada para a microrregião de Viçosa (32.418 hectares de eucalipto).

Para a UTE B, que possui uma potência elétrica desejada de 10 MW, a vazão de vapor é de 40,00 ton/hora a uma pressão de trabalho de 70 bar, o que representa uma capacidade de produção elétrica de 8,89 MWh. Através da Equação 2, chega-se a um consumo de 12.095,2 kg cavaco/hora, ou 1.360,7 kg cavaco/MWh, e em volume 4,99 m<sup>3</sup>/MWh.

Ao se considerar o regime de trabalho anual, a UTE B consumirá 100.655,88 toneladas de cavaco úmido por ano, o que leva a uma área florestal necessária para o projeto de 4.269,49 hectares (ou 609,93 hectares/ano). Essa área representa 13,2% do maciço florestal da região.

Por fim, para a UTE C, de 20 MW de potência elétrica desejada, a produção de vapor é de 80 ton/hora (pressão da caldeira de 70 bar), o que leva a uma capacidade elétrica de 17,78 MWh, necessitando-se de 23.038,4 kg cavaco/hora e 1.295,91 kg cavaco/MWh. O consumo de cavaco úmido por ano é de 191.725,49 ton/ano, representando uma área florestal necessária de 8.132,36 hectares para a vida útil do projeto (ou 1.161,77 hectares/ano), ou seja, a área total representa 25,1% da área de eucalipto considerada para a região.

Em relação à energia elétrica gerada por ano e o número de residências atendidas anualmente, a UTE A é capaz de gerar 41.610 MWh e atender 21.672 residências neste período, levando-se em conta o consumo médio residencial do Sudeste de 160 kWh/mês. Enquanto que a UTE B gera 83.220 MWh/ano, e atende 43.344 residências (exatamente o dobro da UTE A). E a UTE C é capaz de gerar 166.440 MWh/ano, e

atender 86.688 residências (o dobro da UTE B). A Tabela 10 resume os resultados do dimensionamento técnico obtido. Os resultados e dados técnicos completos dos projetos se encontram no Anexo (seção 8.4).

Tabela 10: Resultados do dimensionamento técnico

<b>Dados</b>	<b>UTE A</b>	<b>UTE B</b>	<b>UTE C</b>
Potência Bruta Total (MW)	5,0	10,0	20,0
Produção vapor (ton/h)	26,25	40,00	80,00
Pressão (bar)	45,00	70,00	70,00
Eficiência (%)	80,75	85,00	89,25
Energia hora (MWh)	5,83	8,89	17,78
Consumo combustível			
Kg cavaco/h	7.977,29	12.095,16	23.038,39
M <sup>3</sup> cavaco/h	29,23	44,32	74,43
Kg cavaco/MWh	1.367,54	1.360,70	1.295,91
M <sup>3</sup> cavaco/MWh	5,01	4,99	4,75
Ton/ano	66.387,03	100.655,88	191.725,49
Área floresta necessária			
Total (ha)	2.815,92	4.269,49	8.132,36
Anual (ha)	402,27	609,93	1.161,77
Área necessária total / área estimada região (%)	8,7	13,2	25,1
Energia gerada (MWh/ano)	41.610	83.220	166.440
Residências atendidas/ano	21.672	43.344	86.688

Fonte: Resultados da pesquisa; mdc = metros de cavaco.

Além de atender um número significativo de residências, todos os projetos são capazes de demandar uma porção razoável do maciço florestal existente nessa região, sendo que o maior projeto (UTE C) pode demandar 25,1% da média de plantios tomada como base no estudo.

Compreende-se, com isso, que a implantação de uma usina termelétrica de pequeno a médio porte na região pode ser um atrativo do ponto de vista de aproveitamento de mercado, através da utilização de parte do estoque de madeira disponível. Além do mais, subentende-se que usinas deste porte não necessariamente precisariam comprar ou arrendar terras para realizar plantios florestais, podendo manter o fornecimento com produtores locais, bem como não havendo necessidade de se percorrer grandes distâncias para a compra de madeira, o que pode ser uma vantagem para o empreendimento.

Por outro lado, é razoável supor que projetos maiores, que demandem uma quantidade maior de biomassa florestal, não consigam obter todo o fornecimento desta região, uma vez que parte dos plantios existentes já possui destinação previamente estabelecida, por serem de fomento ou plantios próprios de empresas. Assim, buscar madeira de raios maiores implica em maior custo de logística, e provavelmente redução na economicidade do projeto.

Os resultados obtidos demonstraram não haver proporcionalidade no dimensionamento dos projetos, uma vez que o parâmetro de eficiência da caldeira foi distinto em cada projeto – variando de 80,75% a 89,25% - e a pressão de vapor da caldeira foi distinta na UTE A com relação aos demais, resultando em ganhos de escala e eficiência para os projetos maiores. Caso todos os parâmetros adotados fossem iguais, os resultados seriam basicamente proporcionais. Essa diferenciação ocorre dado que projetos de maior potência possuem maior eficiência de conversão, ou seja, apresentam melhoria nos parâmetros operacionais e técnicos da usina, e foi justamente o que se buscou avaliar neste trabalho.

## **5.2. Simulações de variação nos parâmetros florestais**

Para exemplificar como os parâmetros florestais podem alterar o dimensionamento de projetos termelétricos, este trabalho simulou a variação do Teor de Umidade dos plantios, tendo por base os valores de PCU do eucalipto de 2.750 kcal/kg, e do teor de umidade médio de 30%.

Para realizar as simulações, apenas o projeto UTE B (10 MW) foi avaliado por ser considerada uma usina típica e de potência próxima à média das usinas a resíduos florestais em operação no país.

O teor de umidade é um fator que afeta diretamente o PCU da madeira, conforme se pode observar na sua própria fórmula (Equação 3). Portanto, caso haja um aumento de 10 pontos percentuais no teor de umidade (de 30% para 40%), o PCU cairá para 2.272 kcal/kg, implicando

em um aumento de 21% no consumo de combustível e de 12% na área florestal necessária.

Se o teor de umidade do lote for menor (de 30% para 20%), o PCU da madeira será de 3.229 kcal/kg, e será necessário um consumo de combustível 15% menor, e de área florestal 8% menor. A Tabela 11 resume as variações dos dados obtidos através das simulações do teor de umidade.

Tabela 11: Resultados das simulações de variações no teor de umidade

Dados	UTE B		
	40%	30%	20%
Teor de Umidade	40%	30%	20%
Poder Calorífico Útil (kcal/kg)	2.271,6	2.750,0	3.228,6
Consumo combustível			
Kg cavaco/h	14.643,5	12.095,2	10.302,3
Kg cavaco/ano	121.862,92	100.655,88	85.735,82
<i>Variação consumo</i>	+21%	-	-15%
Área Floresta necessária total (ha)	4.799,80	4.269,49	3.939,68
<i>Variação área</i>	+12%	-	-8%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Denota-se, a partir desta simulação, que variações no Teor de Umidade dos lotes de cavacos afetam diretamente o PCU e, assim, a operação de uma usina termelétrica. Caso o combustível fornecido tenha constantemente um maior teor de umidade (40 a 50% por exemplo), haverá maior necessidade de consumo de biomassa para uma mesma quantidade de energia a ser gerada, além da perda de eficiência na caldeira, maior manutenção nos equipamentos e aumento no custo no processo.

Algumas empresas que trabalham diretamente com a biomassa florestal como fonte de energia termelétrica já se atentaram para isso e estão investindo em equipamentos e laboratórios para controle da qualidade do cavaco e de seus resíduos. Lotes de cavaco com maior qualidade energética (menor teor de umidade e, assim, maior poder calorífico) podem levar a redução de custos e maior eficiência no processo.

Pelo lado do produtor florestal também deve haver maior priorização do fornecimento de cavaco com menor teor de umidade, principalmente,

tendo em vista que muitos empreendimentos poderão pagar valores mais altos por lotes com melhor qualidade energética.

Foram realizadas simulações com relação aos parâmetros florestais densidade básica da madeira e o IMA florestal. Tomando como exemplo a UTE B (10 MW), seu consumo é de 12.095 kg de cavaco por hora. Se a densidade a granel do cavaco for maior do que a determinada neste estudo (de 272,9 para 325,0 kg/m<sup>3</sup>), significa dizer que o consumo de combustível reduzirá de 44,32 para 37,22 m<sup>3</sup> por hora. No entanto, para o setor energético e para os cálculos de conversão energética, é mais importante demonstrar o consumo de cavaco em quilos por hora do que em metros cúbicos (ou metros de cavacos) por hora.

Dessa maneira, alterações na densidade da madeira e no IMA terão maior impacto ao se avaliar a quantidade de área florestal necessária para suprir o consumo de combustível necessário pela usina. Como exemplo, a UTE B demanda 4.269,5 hectares ao todo, tendo por base o IMA de 35 m<sup>3</sup>/ha.ano e a densidade básica média da madeira de 518,15 kg/m<sup>3</sup>. Mantendo-se a densidade básica constante, caso o IMA aumente para 40 m<sup>3</sup>/ha.ano, por exemplo, a área florestal necessária cairá para 3.735,8 hectares. No mesmo sentido, mantendo-se agora o IMA constante, e caso a densidade da madeira suba para 550 kg/m<sup>3</sup>, a área florestal necessária reduzirá para 4.022,2 hectares.

Estes dados demonstram, por conseguinte, que projetos que considerem plantios com maior Incremento Médio Anual e maior densidade básica, demandarão menor área florestal para suprir o consumo da usina.

### **5.3. Potencial para geração de empregos**

O uso da biomassa florestal como fonte de energia tem o potencial de gerar mais empregos do que as fontes não renováveis, levando em consideração os empregos diretos e indiretos gerados no campo e nas indústrias. Essa relação pode ser explicitada através da relação da densidade entre combustíveis fósseis e a biomassa florestal, uma vez que

para uma mesma quantidade de energia gerada por combustíveis fósseis, seria necessário mais biomassa florestal para gerar essa energia (densidade a granel média do cavaco de 272 kg/m<sup>3</sup> e densidade do óleo combustível 980 kg/m<sup>3</sup>). Isso representa maior necessidade de transporte, logística e toda uma cadeia envolvida.

Além de contribuir para o desenvolvimento do meio rural, com a inserção de pequenos e médios produtores no mercado florestal, o setor tem alta relação com indústrias e comércios, o que pode impactar o Produto Interno Bruto de municípios e regiões. Somente em 2016, o setor de florestas plantadas empregou um total de 510 mil pessoas e apresentou PIB setorial de R\$ 71,1 bilhões no país (IBÁ, 2017).

Alguns estudos, por exemplo, avaliaram a contribuição do setor de florestas plantadas através da variação decenal do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), observando que os municípios que possuem plantios comerciais de árvores obtiveram melhorias nos fatores educação, longevidade e renda da IDHM médio, em comparação a evolução média brasileira nas últimas publicações (ALMEIDA et al., 2008; GURGEL et al., 2009; IBÁ, 2016; MACHADO, 2004). Dessa maneira, um dos grandes diferenciais da UTE a biomassa florestal está nos aspectos sociais, além do ambiental e econômico.

Para este trabalho, foi estimado o potencial de geração de empregos para cada projeto, com base na área florestal demandada e nas proporções abordadas na seção de Materiais e Métodos. A Tabela 12 resume os dados encontrados. Por mais que seja apenas um exercício de comparação via proporção de dados já divulgados, é razoável supor que um projeto como a UTE B, que demanda 5.751,8 hectares, tem potencial para gerar 374 postos de trabalho diretos e 2.714 postos totais, tendo em vista o efeito multiplicador do setor florestal no comércio e nas indústrias.

Tabela 12: Potencial de geração de empregos em cada projeto

<b>Projetos</b>	<b>UTE A</b>	<b>UTE B</b>	<b>UTE C</b>
Potência Bruta Total (MW)	5,0	10,0	20,0
Área Floresta necessária (ha)	2.815,92	4.269,49	8.132,36
Empregos diretos gerados	183	278	529
Postos de trabalho totais*	1.329	2.015	3.838

Fonte: Resultados da pesquisa com base em IBÁ (2017). \*Postos diretos, indiretos e resultantes do efeito renda (IBÁ, 2017).

#### **5.4. Análise econômica – estudo de caso**

Para a análise econômica, considerou-se uma usina termelétrica a cavaco de madeira típica do setor elétrico brasileiro, ou seja, representada pelo projeto UTE B, de 10 MW de capacidade instalada, localizada na microrregião de Viçosa (MG), para atender o subsistema Sudeste/Centro-Oeste, com construção iniciada em janeiro de 2018 e início de operação em janeiro de 2020.

O período de construção considerado foi de 24 meses, e a vida útil do projeto de 300 meses (ou 25 anos). O investimento total estimado para o projeto foi de R\$ 55,0 milhões, ou R\$ 5,5 mil /quilowatt instalado (kW inst), valor bem próximo da média dos demais empreendimentos a biomassa deste porte, conforme dados da CCEE. O custo de capital para o projeto é de 15% ao ano (também denominado taxa de desconto).

Os investimentos foram compostos por 30% de recursos próprios e 70% de recursos de terceiros, tomando como referência 100% de captação dos recursos de terceiros pelo BNDES, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. O cronograma de desembolso prevê 50% dos investimentos totais desembolsados no ano 1 (um), ou seja, em 2018, e 50% dos investimentos no ano 2 (dois), em 2019.

Em relação aos parâmetros técnicos da usina, considerou-se um fator de disponibilidade de 95,1%, e fator de capacidade de 100%. Para calcular a disponibilidade bruta máxima, ponderou-se que a Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (TEIF) foi de 1,50%, e a Indisponibilidade Programada (IP) de 3,50%. Assim, a usina tem potência líquida para operar de 9,51 MW e Garantia Física de 9,41 MWmed. Todos os parâmetros são comuns à termelétricas deste porte a biomassa. O preço do cavaco considerado foi de 125 reais por tonelada.

Os principais parâmetros adotados estão na Tabela 13:

Tabela 13: Principais parâmetros do projeto

Dados	Unidade	Valor	Dados	Unidade	Valor
<b>Dados Projeto</b>			<b>Dados Técnicos</b>		
Ano inicial	-	2018	Potência Total	MW	10,00
Vida útil do projeto	Anos	25	Fator de Capacidade	%	100,00
Investimento Total	MM R\$	55,00	Fator de Disponibilidade	%	95,10
Investimento	R\$/kW inst.	5.500,00	Potência Líquida	MW	9,51
Custo de Capital Próprio	% a.a.	15,00	Garantia Física	MWmed	9,41
<b>Impostos</b>			<b>Despesas</b>		
Regime de Tributação	-	Lucro Real	O&M Variável	R\$/MWh	10,58
PIS	%	1,65	O&M Fixo	MM R\$ / ano	3,00
COFINS	%	7,60	Custo ONS	MM R\$ / ano	0,004
Limite de Faixa do IR	MM R\$/mês	0,020	Custo CCEE	MM R\$ / ano	0,006
Contribuição Social - CSSL	%	9,00	TUST	R\$/KW.mês	2,00
ICMS	%	0,00	Seguros	%	0,50
<b>Combustível</b>			<b>Captação de Recursos</b>		
Tipo	-	Cavaco	Fiscalização	% Invest.	0,40
Heat Rate Médio	Kcal/KWh	3.061,19	Benefício Econômico	R\$/KW.ano	639,06
Rendimento	%	28,09	Depreciação		
PCU	Kcal/kg	2.750,00	Obras Civis	% a.a.	4,00
Preço da Commodity	R\$/ton	125,00	Equipamentos	% a.a.	10,00
Percentual de <i>Take or Pay</i>	%	50,00	<b>Sistema de Amortização</b>		
			Taxa de Juros Real	% a.a.	4,00
			Amortização	Meses	240
			Fim da Carência	Mês/ano	Dez/2019

Fonte: Elaboração própria com base em Marzano et al., (2007).

A partir disso, foram analisadas três hipóteses de contratação de energia pela UTE a cavaco: i) energia integralmente contratada no mercado regulado (ACR); ii) energia integralmente contratada no mercado livre (ACL); iii) energia contratada parcialmente nos dois mercados (ACR e ACL).

#### 5.4.1. Energia integralmente contratada no mercado regulado (ACR)

Assumiu-se, neste caso, que 100% da garantia física da usina (9,41 MW) foi comercializada em contrato do tipo Disponibilidade no mercado regulado. Considerou-se, portanto, que a UTE participou e ganhou licitação em leilão de energia com início da venda de energia previsto para janeiro de 2020.

Entende-se que o risco para o investidor nesse cenário é zero, dado que a usina uma receita fixa anual garantida, paga pelo governo, que remunera seus investimentos até o nível de inflexibilidade, além de uma receita variável para cobrir seus custos operacionais de despacho acima da inflexibilidade.

No caso base para os três cenários, o nível de inflexibilidade considerado foi de 50% da capacidade instalada da termelétrica. Esse nível de inflexibilidade significa que o empreendimento será despachado, no mínimo, em sua inflexibilidade.

A decisão acerca do nível de inflexibilidade traz uma questão importante para o empreendimento e para os fornecedores do combustível (cavaco, no caso). Usinas que apresentam um nível de inflexibilidade mais baixo, possivelmente terão uma receita fixa mais baixa para ser declarada e, portanto, poderão ter um ICB mais baixo em comparação com usinas de inflexibilidade maior, o que as deixará em vantagem em um possível leilão. Essa lógica pode ser demonstrada pelas equações de cálculo da receita fixa e do ICB, apresentadas na seção de Materiais e Métodos.

Nessa lógica, portanto, quanto menor o nível de inflexibilidade, maior poderá ser a dificuldade da usina em assegurar contratos de longo prazo com fornecedores de cavaco, uma vez que a termelétrica terá menor nível de despacho mínimo, e piora na previsão do quanto de combustível será necessário quando for despachada pelo sistema. Exemplificando, quando uma usina com nível de inflexibilidade menor, de 10%, for chamada a despachar, só terá garantia de despacho mínimo de 10% durante um período operacional, o que pode representar uma reduzida demanda por combustível.

Por outro lado, usinas que declarem um nível de inflexibilidade maior (como a do caso base, de 50%), já possuem a garantia de demandar uma quantidade de combustível necessária maior para o despacho mínimo, que seria o seu nível de inflexibilidade. Isso facilita na negociação de fornecimento de combustível e, inclusive, na segurança do abastecimento de cavaco a longo prazo.

Para corroborar essa questão, foi realizada uma análise de sensibilidade do valor do ICB, da receita fixa anual e das despesas variáveis com relação ao nível de inflexibilidade da usina, variando de 10% a 50%.

Os resultados, apresentados na Tabela 14, demonstram que quanto menor o nível de inflexibilidade, menor será o ICB e a receita fixa anual. Isso se justifica dado que a receita fixa representa a remuneração exigida pelo investidor para cobrir os custos fixos anuais do empreendimento termelétrico e, dessa maneira, quanto menor o nível de inflexibilidade, menor os custos e menor a receita fixa.

Por outro lado, quanto maior o nível de inflexibilidade, maior será a receita fixa necessária para cobrir os gastos fixos da usina e maior será o ICB. No caso base, com um nível de inflexibilidade de 50%, a UTE obteve um ICB de R\$258,15 /MWh e Receita Fixa anual de R\$ 17,60 milhões. No entanto, as despesas variáveis, em R\$/MWh gerado, também aumentam com o maior nível de inflexibilidade, tendo em vista o maior gasto com combustível para geração elétrica.

O Custo Variável Unitário (CVU) da termelétrica para todos os níveis de inflexibilidade foi de 151,00 R\$/MWh, representando o valor necessário para cobrir os custos operacionais do empreendimento (custo de combustível + O&M variável).

Tabela 14: Análise de sensibilidade com relação ao nível de inflexibilidade da UTE.

<b>Nível de Inflexibilidade (%)</b>	<b>ICB (R\$/MWh)</b>	<b>Receita Fixa Anual (MM R\$)</b>	<b>Despesas Variáveis (R\$/MWh)*</b>
10	235,24	11,93	16,32
20	240,92	13,34	32,21
30	246,64	14,76	48,10
40	252,42	16,18	63,99
50	258,15	17,60	79,86

Fonte: Resultados da pesquisa; \*Considera o somatório das despesas variáveis no primeiro ano de operação dividido pela energia elétrica gerada no ano.

Ao se assumir um nível de inflexibilidade mais alto, de 50%, por mais que a UTE tenha relativamente menor chance de sair vencedora em um leilão de energia, pode-se dizer que seu projeto será mais atrativo tanto

para o governo, em razão das melhores garantias de fornecimento de energia e segurança de combustível, quanto para os fornecedores de madeira, que poderão ter um fluxo mais seguro e previsível de fornecimento, e por um prazo mais longo.

Com base nas estimativas de fluxo de caixa livre do projeto 100% contratado no ACR, e para todos os níveis de inflexibilidade, o VPL a uma taxa de desconto de 15% equivale a zero, uma vez que a Receita Fixa anual estimada equivale ao PEQ, e assim, a TIR real será de 15,00% ao ano, equivalente a taxa de desconto. Isso ocorre porque o PEQ representa o preço de energia contratada cujo fluxo de caixa associado, quando descontado pelo custo de capital, produz um VPL nulo. Assim, ele representa o menor preço que o empreendedor pode ofertar no leilão sem ter prejuízo, isto é, ao ICB.

Ao se realizar a sensibilidade do VPL em função de diferentes taxas de desconto, observou-se que seu valor pode variar de R\$ 9,81 milhões (a 10% de desconto), até negativo em R\$ 5,02 milhões a uma taxa de 20%, o que já torna o projeto inviável economicamente, conforme apresentado no Gráfico 2.

Válido ressaltar que a taxa de desconto adotada, de 15% ao ano, pode ser considerada bastante conservadora. Projetos de energia costumam utilizar entre 10-12% ao ano.

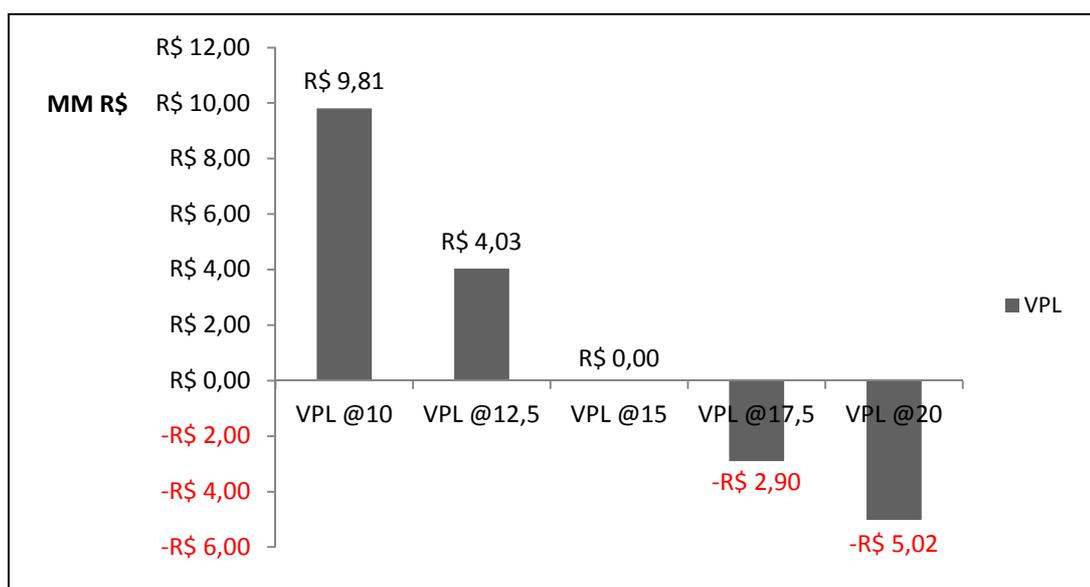


Gráfico 2: Sensibilidade do Valor Presente Líquido em função de diferentes taxas de desconto (10%, 12,5%, 15%, 17,5% e 20%).

Fonte: Resultados da pesquisa.

#### **5.4.2. Energia integralmente contratada no mercado livre (ACL)**

Neste caso, assumiu-se que a usina, com nível de inflexibilidade de 50% está totalmente contratada no ACL a partir de um contrato bilateral. Neste cenário, portanto, o investidor está assumindo os riscos hidrológicos e está sujeito às oscilações de preço no mercado de curto prazo.

Foram gerados 2.000 cenários de fluxo de caixa, de janeiro de 2018 a dezembro de 2042, tendo por base os cenários estimados de despacho elétrico, relacionados às expectativas de custo de operação do sistema. Os cenários de despacho e de custo de operação do sistema foram rodados pelo NEWAVE e as estimativas financeiras pelo ANAFIN.

A tarifa assumida para a venda da energia foi de R\$ 310 /MWh. Esse valor tem como base o valor do ICB de uma UTE a cavaco de eucalipto, vencedora do 21º Leilão de Energia Nova, atualizado pelo IPCA de junho de 2017.

Por meio da análise determinística de apenas um fluxo de caixa, e com base nos parâmetros citados, no caso base essa usina obteve VPL de R\$ 7,67 milhões, TIR de 20,40% a.a., e Preço de Equilíbrio (PEQ) de 291,10 R\$/MWh, sob custo de capital próprio de 15% ao ano.

Realizou-se análise de sensibilidade para verificar como variações no preço de venda da energia podem afetar o VPL e a TIR do projeto, na perspectiva do investidor, uma vez que o investidor estará sujeito a este risco. Considerando o cenário base onde o preço da energia estipulado foi de 310,00 R\$/MWh, caso essa tarifa se reduza para 280,00 R\$/MWh, o VPL do projeto será negativo em R\$ 4,50 milhões, e será zerado ao preço de R\$ 291,10 /MWh, que é o Preço de Equilíbrio (PEQ). Por outro lado, caso o preço de venda da energia aumente bastante, para R\$ 350 /MWh, por exemplo, o VPL será de R\$ 23,90 milhões e a TIR de 30,83% a.a.. A Tabela 15 apresenta os resultados dessa sensibilidade.

Tabela 15: Sensibilidade para o Preço de Energia no ACL

<b>Preço de Energia</b>	<b>VPL</b>	<b>TIR</b>	<b>TJEQ (%a.a.)*</b>
-------------------------	------------	------------	----------------------

(R\$/MWh)	(MM R\$)	(% a.a.)	
280,00	-4,50	11,64	1,47
285,00	-2,47	13,17	2,61
290,00	-0,45	14,67	3,75
295,00	1,58	16,15	4,90
300,00	3,61	17,59	6,07
305,00	5,64	19,01	7,25
310,00	7,67	20,40	8,44
315,00	9,70	21,77	9,64
320,00	11,73	23,12	10,85
325,00	13,75	24,45	12,08
330,00	15,78	25,77	13,32
335,00	17,81	27,06	14,57
340,00	19,84	28,33	15,83
345,00	21,87	29,59	17,11
350,00	23,90	30,83	18,40
355,00	25,92	32,05	19,70
360,00	27,95	33,26	21,02
365,00	29,98	34,45	22,35
370,00	32,01	35,63	23,69
375,00	34,04	36,79	25,05
380,00	36,07	37,94	26,42

Fonte: Resultados da pesquisa. \*TJEQ = Taxa de Juros de Equilíbrio: representa o valor máximo da taxa de juros negociado com as instituições financiadoras do projeto que permite que o capital dos seus acionistas seja remunerado aos seus respectivos custos de capital (CEPEL, 2017).

Outra análise realizou sensibilidade do VPL e da TIR, na perspectiva do investidor, tendo em vista variações no preço do combustível, tomando como referência o preço no caso base de R\$ 125 /ton cavaco.

Caso o preço do cavaco aumente para R\$ 140,00 /ton, o VPL atingirá seu valor mínimo de R\$ 0,26 MM, se tornando negativo em R\$ 145,00 /ton. Por outro lado, o VPL será significativamente maior caso o preço do cavaco se reduza para R\$ 100,00 /ton, chegando a R\$ 20,02 milhões. A Tabela 16 apresenta os resultados dessa sensibilidade.

Tabela 16: Sensibilidade para o preço do combustível

Preço do Combustível (R\$/ton)	VPL (MM R\$)	TIR (% a.a.)	PEQ (R\$/MWh)
100,00	20,02	28,44	260,66
105,00	17,55	26,89	266,75
110,00	15,08	25,31	272,84
115,00	12,61	23,71	278,92
120,00	10,14	22,07	285,01
125,00	7,67	20,40	291,10
130,00	5,20	18,70	297,19
135,00	2,73	16,97	303,27
140,00	0,26	15,19	309,36
145,00	-2,21	13,37	315,44
150,00	-4,68	11,50	321,53

155,00	-7,15	9,57	327,62
160,00	-9,62	7,57	333,71
165,00	-12,09	5,47	339,80
170,00	-14,56	3,25	345,88
175,00	-17,03	0,86	351,97
180,00	-19,50	0,00	358,05
185,00	-21,96	0,00	364,14
190,00	-24,43	0,00	370,23
195,00	-26,90	0,00	376,32
200,00	-29,37	0,00	382,41

Fonte: Resultados da Pesquisa; PEQ = Preço de Equilíbrio

A última análise de sensibilidade relacionada ao caso dois (energia integralmente contratada no ACL) buscou verificar quais são as variáveis financeiras que mais afetam o VPL e a TIR do projeto. Os principais parâmetros que mais afetaram o VPL, positivamente ou negativamente, foram: Preço da Energia Contratada, Investimentos, Custo de Capital Próprio e O&M Variável. Alterações de 10% no preço da energia contratada resultaram em variações, ao total, de R\$ 25,2 milhões sobre o VPL, sendo seu maior valor de R\$ 20,2 milhões, e o menor de negativo em R\$ 4,9 milhões. O Gráfico 3 apresenta essa análise.

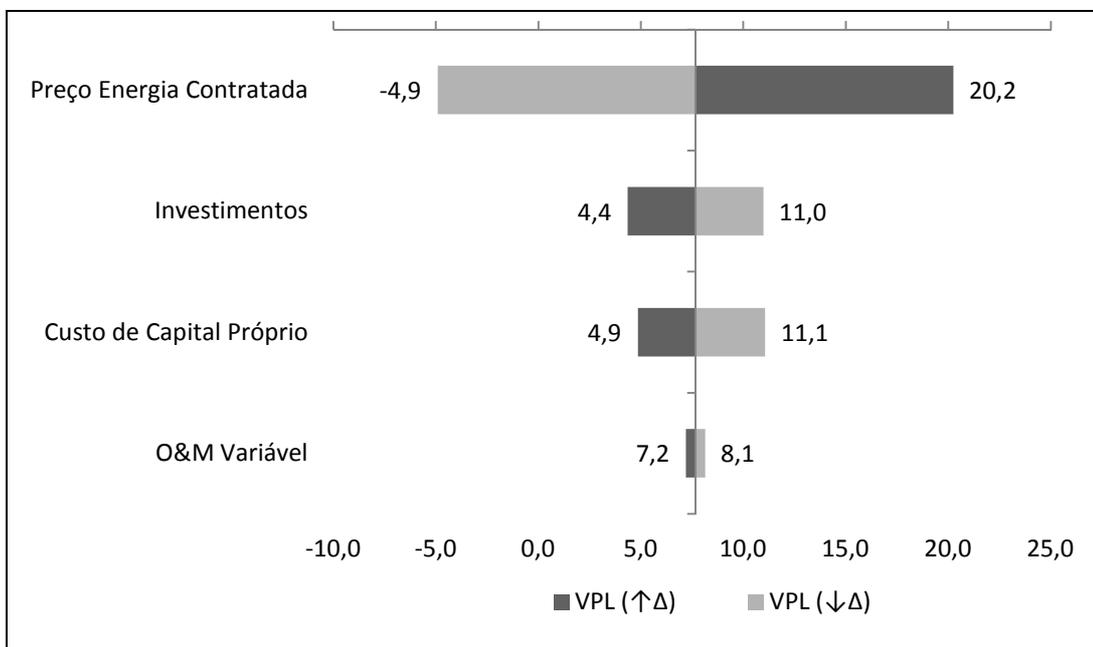


Gráfico 3: Análise de sensibilidade do VPL com relação a parâmetros financeiros  
Fonte: Resultados da pesquisa.

A mesma análise de sensibilidade foi realizada para a TIR, onde se observou que os parâmetros financeiros que mais afetaram a TIR foram:

Preço da Energia Contratada, Investimentos e O&M Variável. Se comparada à sensibilidade do VPL, apenas a ordem dos dois últimos indicadores foi alterada, já que o custo de capital não tem impacto na TIR do projeto. Alterações de 10% no preço da energia contratada afetaram em 17,3 pontos percentuais a TIR, com máximo de 28,6% e mínimo de 11,3%. O Gráfico 4 apresenta os resultados dessa análise.

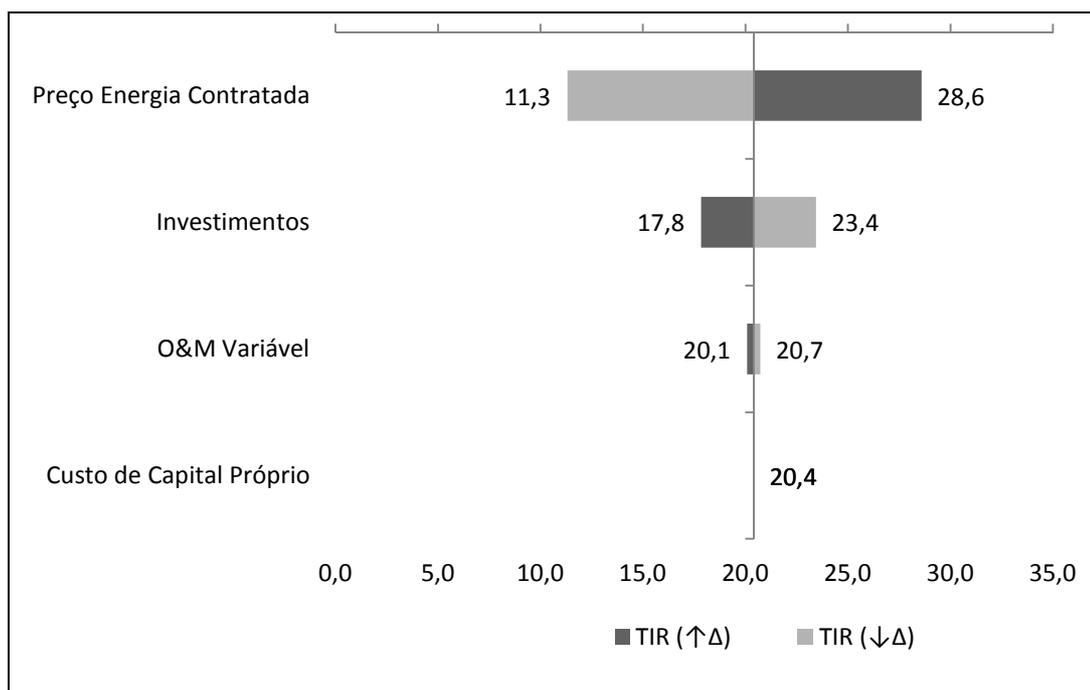


Gráfico 4: Análise de sensibilidade da TIR com relação a parâmetros financeiros.  
Fonte: Resultados da pesquisa

Foram realizadas análises de risco pelo ANAFIN para verificar, na perspectiva do investidor, os cenários de risco do VPL e da TIR, quando a usina está contratada somente no mercado livre. Estas análises foram realizadas a partir de variações no Custo Marginal de Operação e na perspectiva de geração elétrica da usina.

Na primeira análise, fez-se uma análise probabilística e verificou-se a distribuição de probabilidade do VPL e da TIR com base nos 2.000 cenários de fluxo de caixa que foram gerados para os 25 anos de projeto. Com relação ao VPL, as principais estatísticas obtidas demonstraram que o VPL médio foi de R\$ 20,79 milhões, com Desvio Padrão de R\$ 3,76 milhões e coeficiente de variação da média dos VPLs de 0,40%. O

Gráfico 5 ilustra a distribuição de probabilidades do VPL obtida para este caso.

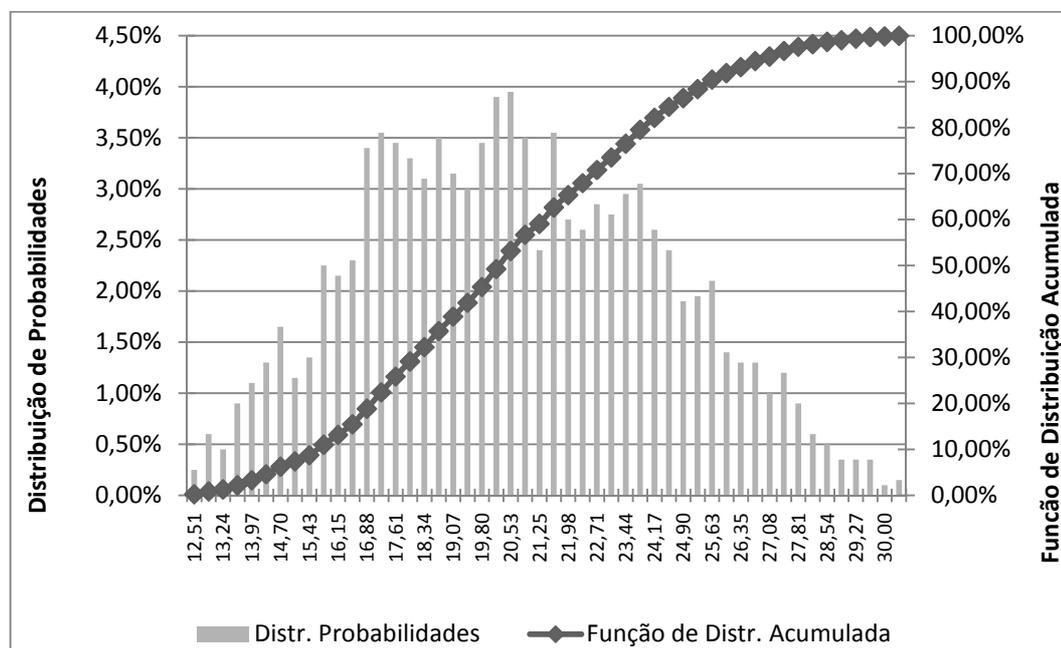


Gráfico 5: Distribuição de Probabilidades do Valor Presente Líquido.  
Fonte: Resultados da pesquisa.

Em relação à TIR, a média da TIR para os 2.000 cenários de fluxo de caixa foi de 29,52%, com Desvio Padrão de 2,26% e coeficiente de variação de 7,66%. O Gráfico 6 apresenta a distribuição de probabilidades da TIR.

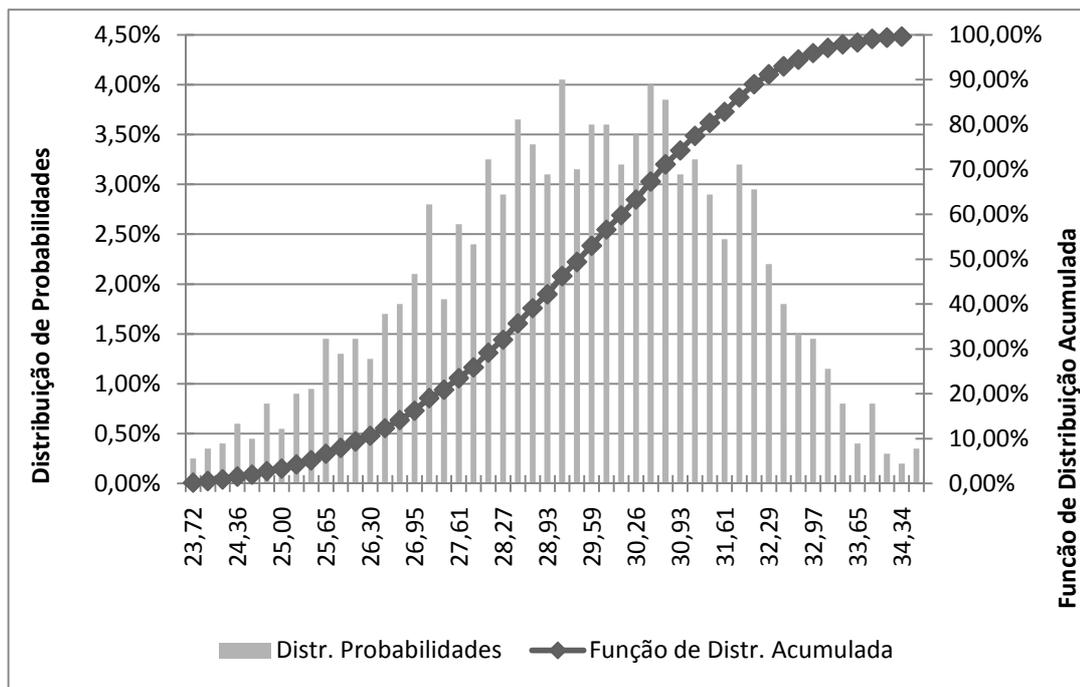


Gráfico 6: Distribuição de Probabilidades da Taxa Interna de Retorno.  
 Fonte: Resultados da pesquisa.

### 5.4.3. Energia parcialmente contratada nos dois mercados (ACR e ACL)

Neste último caso, assumiu-se que a usina está 100% contratada e sua estratégia foi comercializar simultaneamente sua energia via contratos bilaterais no ACL, onde os riscos hidrológicos são assumidos pelo gerador, e via mercado regulado (ACR), onde os riscos são repassados ao consumidor final. Ao participar concomitantemente dos dois mercados, o investidor do empreendimento consegue mitigar parte dos riscos hidrológicos assumidos via ACL.

Assim como nos dois últimos casos, a usina apresenta nível de inflexibilidade de 50%. Foram assumidos diferentes percentuais de contratação em cada mercado para verificar o comportamento das seguintes estatísticas: VPL médio, Desvio Padrão do VPL, TIR média e Desvio Padrão da TIR.

Para cada um dos 2.000 cenários de fluxo de caixa estimados do ACL, foi combinado um fluxo de caixa do ACR, com distintos percentuais para cada mercado: 50% para cada mercado; 25% ACL / 75% ACR; e 75% ACL / 25% ACR. A tarifa de venda da energia contratada no ACL foi

de R\$ 310/MWh. A Tabela 17 apresenta os principais resultados dessa análise de sensibilidade. As demais estatísticas estimadas se encontram no Anexo (seção 8.3).

Tabela 17: Resultados da análise de sensibilidade quanto a diferentes percentuais de participação nos mercados de energia.

<b>% Energia contratada no ACL</b>	<b>% Energia contratada no ACR</b>	<b>VPL médio (MM R\$)</b>	<b>DP do VPL (MM R\$)</b>	<b>TIR média (% a.a.)</b>	<b>DP da TIR (%)</b>
75%	25%	6,69	1,32	25,62	1,82
50%	50%	4,21	0,88	21,84	1,28
25%	75%	1,73	0,44	17,89	0,70

Fonte: Resultados da pesquisa; DP = Desvio padrão.

Conforme se pode observar nos resultados da tabela, a UTE apresentou maior viabilidade econômica no cenário em que possui maior participação no mercado livre, e menor no regulado (75% ACL / 25% ACR), com VPL médio de R\$ 6,69 MM e TIR média de 25,62% (ao ano). No cenário em que possui igual participação nos dois mercados (50% ACL / 50% ACR), a usina apresentou resultados piores do que no primeiro cenário comentado, mas ainda melhores do que no cenário em que possui menor participação no mercado livre, e maior no regulado (25% ACL / 75% ACR).

Ainda assim, todos os três cenários analisados obtiveram VPL médio positivo e TIR média acima da Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é o próprio custo de capital da empresa considerado, de 15% ao ano. Com base nos resultados obtidos neste terceiro caso, onde a usina atua nos dois mercados ao mesmo tempo, observou-se que quanto maior for a participação da usina no mercado livre (ACL), melhores serão seus resultados econômicos.

Entretanto, importante ressaltar alguns pontos com relação a estes resultados: i) o risco no mercado livre é maior, dado que o empreendimento assume os riscos hidrológicos no ACL e está exposto às flutuações de preços do mercado; ii) o maior Desvio Padrão de VPLs e TIR nos casos em que há maior participação no ACL também corrobora o maior risco; iii) mesmo que não tenha ocorrido VPL negativo, o preço

utilizado nestas análises foi de R\$ 310 /MWh, que é superior ao preço de equilíbrio do empreendimento.

#### 5.4.4. Comparação entre os casos

Do ponto de vista econômico, todos os casos podem ser considerados economicamente viáveis, com VPL positivo e TIR acima da TMA. Denota-se que as maiores viabilidades econômicas relativas foram obtidas nos casos em que a usina tem maior participação no mercado livre, e menor no regulado.

Conforme se pode observar na Tabela 18, o maior VPL foi encontrado no caso em que a usina é 100% contratada no mercado livre (ACL), com VPL médio de R\$ 20,79 MM e TIR média de 29,52% a.a., ao preço de energia contratada de R\$ 310,00 /MWh. Porém, nesta situação, embora o retorno médio aumente se comparado ao mercado regulado, há um elevado grau de risco assumido pelo empreendimento e alto grau de dispersão da distribuição – maior Desvio Padrão médio. Além disso, o preço utilizado no ACL foi maior do que o preço do ACR, que seria o ICB, o que reduz o efeito comparativo entre os resultados.

Por outro lado, o resultado de menor viabilidade econômica relativa foi obtido no caso em que a usina é 100% contratada no mercado regulado, via leilão de energia, com VPL nulo e TIR de 15,00 % a.a.. Contudo, este resultado não pode ser considerado ruim. Pelo contrário, no ACR o retorno é garantido pela Receita Fixa anual e o risco é zero, fora a questão comparativa entre os preços utilizados.

Tabela 18: Resumo dos resultados econômicos encontrados.

% Energia contratada no ACL	% Energia contratada no ACR	VPL médio (MM R\$)	DP do VPL (MM R\$)	TIR média (% a.a.)	DP da TIR (%)
100%	0%	20,79	3,76	29,52	2,26
75%	25%	6,69	1,32	25,62	1,82
50%	50%	4,21	0,88	21,84	1,28
25%	75%	1,73	0,44	17,89	0,70
0%	100%	0	-	15,00	-

Fonte: Resultados da pesquisa.

É importante ressaltar que a estratégia de se comercializar energia simultaneamente nos dois ambientes de contratação levou a resultados satisfatórios na análise econômica, com VPL positivo, TIR acima da TMA em todos os casos, e melhor distribuição de risco, uma vez que a participação no ambiente regulado leva a mitigação dos riscos hidrológicos decorrentes da participação no mercado livre.

Cabe, portanto, ao investidor do empreendimento analisar qual a melhor estratégia de participação no mercado de energia tendo em vista o conhecimento dos riscos, das estimativas de seu fluxo de caixa e o seu apetite ao risco, o que implicará em uma análise econômica mais acertada para a sua estratégia.

Caso o investidor tenha como opção participar apenas do mercado livre (100% ACL), as análises também demonstraram que existe forte sensibilidade dos indicadores econômico-financeiros com relação às variações no preço de energia, nos investimentos, no custo de capital próprio, no O&M variável e no preço do combustível. Flutuações nestes parâmetros podem levar a redução e inclusive perda da economicidade do projeto, com VPL negativo.

Para o parâmetro Preço da Energia Contratada, cabe ao investidor buscar assegurar um contrato bilateral de energia com um preço que leve a sua viabilidade econômica, avaliando constantemente o cenário e as condições do mercado de energia no curto prazo, tais como o PLD e o custo de operação do sistema. Com relação ao parâmetro Preço do Combustível, também cabe ao investidor buscar contratos com fornecedores de madeira que não tornem inviável seu projeto, e por um prazo que se ajuste a sua produção de energia. Trabalhar de maneira eficiente com estas variáveis pode levar a redução dos riscos do empreendimento frente às flutuações do mercado.

## **5.5. Diagnóstico e recomendações**

As análises técnica e econômica realizadas levaram a resultados que corroboraram a utilização da biomassa florestal como fonte de

energia termelétrica no país. O incremento de projetos deste modelo pode contribuir para a regularização da geração e distribuição de energia de forma contínua (não intermitente), através de um combustível renovável.

Caso o investidor opte por participar apenas do ambiente regulado (caso um), as análises demonstraram que a geração termelétrica com biomassa florestal pode ser feita a preços competitivos, com ICB dentro da realidade, e remuneração fixa justa ao investidor. Nos últimos Leilões de Energia Nova, por exemplo, diversos empreendimentos a biomassa que saíram vencedores tiveram ICB variando de R\$ 199,00 /MWh a R\$ 272,00 /MWh, com média de R\$ 251,27 /MWh. Como os índices calculados no estudo de caso permaneceram dentro desse intervalo, pode-se concluir que há espaço para inserção de novos projetos.

A seguir foram listados alguns pontos que este trabalho considera de suma importância para melhorar os critérios de participação da biomassa florestal como fonte de energia termelétrica no ambiente regulado:

**1) Decisão quanto ao nível de inflexibilidade de despacho:** para minimizar os riscos de desistências e revogações de outorgas das usinas, estes projetos devem ser estruturados para um nível de inflexibilidade que seja adequado a sua realidade de oferta de madeira e custo de produção. Isso porque as análises demonstraram que quanto maior o nível de inflexibilidade, maior os custos variáveis, maior a receita fixa a ser exigida, e maior o ICB. Dessa forma, muitos projetos podem se beneficiar e optar por um menor nível de inflexibilidade, resultando em menor custo de produção e menor ICB, o que facilitaria sua entrada via leilão. No entanto, a realidade mostra que esses projetos podem correr riscos de assegurar um fluxo estável de combustível (madeira), podendo não atender a demanda de despacho elétrico pelo ONS. Para o governo, inclusive, esse é um risco que está sendo bastante discutido, dado que alguns projetos a biomassa que conseguiram ganhar a licitação no leilão, e se encontram em construção, já estão se mostrando economicamente inviáveis e com riscos de não conseguirem plantios para o fornecimento de energia.

**2) Comprovação da existência de plantios:** o governo deve exigir a comprovação da existência de plantios florestais em quantidade e qualidade suficientes para o abastecimento da UTE. Portanto, deve haver o correto encontro de informações entre a capacidade de produção da termelétrica, seu consumo de madeira, e a comprovação da existência de plantios em condições de abastecimento dessa usina. Logo, deve-se buscar, por parte do governo, no papel de suas agências reguladoras: i) priorizar projetos que possuam plantios florestais já implantados, que apresentem material comprobatório da existência dos plantios e de sua disponibilidade; ii) informações patrimoniais dos proprietários (produtores), e se possível, inventário florestal certificado por empresas especializadas do setor; iii) plano de manejo para utilização dos plantios por parte da usina; iv) comprovação dos investimentos prévios e futuros na produção florestal.

**3) Adequação dos critérios dos leilões para a biomassa florestal:** dado que a energia produzida pela biomassa florestal pode ser feita de forma dedicada, e não sazonal, o cavaco de madeira tem condições de participar do certame tanto em contratos por Disponibilidade, quanto em contratos na modalidade por Quantidade, o que pode abrir um novo leque de opções para o setor. Portanto, deve haver um tratamento diferenciado da biomassa florestal em relação às demais fontes renováveis, adequando sua participação para um modelo em que não haja a competição direta com o bagaço da cana, por exemplo, mas sim havendo complementariedade a esta. Diante de tais adequações, é possível que a remuneração desses projetos seja mais condizente com o investimento florestal, e possa atrair e estimular a entrada de novos projetos de energia de biomassa florestal.

Do ponto de vista do investidor, além de se atentar às questões já expostas acima, o mesmo deve levar em conta os diversos aspectos florestais que podem afetar diretamente seu projeto (listados abaixo), bem como as estratégias para mitigação de seus riscos quanto aos:

**1) Parâmetros florestais:** os resultados apresentados por este trabalho demonstraram que buscar plantios florestais com melhor qualidade para energia pode afetar positivamente as operações da usina e a economicidade dos projetos. Indicadores como o teor de umidade, a densidade básica da madeira e a produtividade florestal (IMA) podem levar a uma significativa melhora (ou piora) das operações. Portanto, deve-se ter melhor conhecimento da qualidade do combustível entregue na usina, buscando maior uniformidade e o menor teor de umidade possível que não afete a operação do picador.

**2) Logística florestal:** buscar madeira de maiores distâncias pode encarecer o gasto da usina com combustível, impactando diretamente a economicidade do projeto. Assim, projetos de usinas termelétricas devem ser desenvolvidos para a realidade florestal da região. Como exemplo, neste estudo se observou que uma usina termelétrica de pequeno a médio porte pode ser dimensionada para a microrregião de Viçosa, MG, onde há uma quantidade considerável de plantios florestais de eucalipto sem destinação e relativamente próximos. No estado de Minas Gerais, sobretudo, existem outras regiões com maciço florestal ocioso, podendo servir de base para novos estudos e projetos como este.

**3) Estratégias para mitigação de riscos em projetos termelétricos:** este trabalho demonstrou nas análises de risco que existem diversas variáveis que podem afetar a economicidade de projetos de energia. Cabe ao investidor do empreendimento analisar e levar em conta os seguintes pontos: i) estratégia de participação em cada mercado (livre e regulado) a partir de seu apetite ao risco; ii) integração do projeto como um todo – desde a parte da logística da madeira, qualidade do combustível, especificidades técnicas da usina, até as questões econômicas e financeiras; iii) alinhamento das condições de mercado – ou seja, cabe ao investidor ter o conhecimento das questões regulatórias, do preço da energia no mercado, do preço do combustível, do financiamento, da competitividade com outros mercados por madeira, como o mercado de carvão vegetal, que esteve bastante ativo até a década passada, etc;

iv) perfil do investimento e do investidor – decisões sobre considerar a floresta como um ativo e ser detentora dela ou apenas comprar cavaco de terceiros são questões de suma importância na estratégia do investimento, e que dependem do caixa do projeto, do capital de giro, do perfil do investidor, que pode já possuir plantios ou que prefere apenas ser proprietário de um empreendimento de energia. Todas essas questões são relevantes no desenvolvimento de um projeto termelétrico.

Por fim, o incentivo à utilização de um combustível renovável como a biomassa florestal na matriz elétrica brasileira pode servir para estimular uma gama de segmentos econômicos, financeiros, sociais e ambientais:

- Do ponto de vista econômico, o incentivo à extensa cadeia produtiva florestal pode levar a maior arrecadação de impostos (nas esferas municipais e estaduais, inclusive), melhoria no PIB municipal e atração de segmentos de alta tecnologia, seja para o setor energético quanto para a silvicultura, colheita, etc.

- Do ponto de vista financeiro, novas linhas de financiamento podem ser estimuladas para se adequar aos projetos florestais para energia, que dependem de um maior prazo de maturação em razão dos ciclos de corte mais longos dos plantios (se comparados às *commodities* agrícolas), das questões temporais de plantios, etc.

- Do ponto de vista social, projetos de pequeno a médio porte como os analisados neste trabalho têm elevado potencial de geração de emprego no campo e na indústria. Além do mais, o maior investimento no campo pode reduzir o êxodo rural e incentivar famílias a continuarem no campo, o que é relevante para não se gerar grande concentração de terras sob a posse de poucos produtores.

- Do ponto de vista ambiental, o incentivo ao uso de um combustível renovável traz consigo o endereçamento das metas para redução das emissões de carbono, podendo inclusive estimular o aumento de projetos de reflorestamento no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma vez que projetos de usinas termelétricas a biomassa florestal podem reduzir emissões de gases do efeito estufa, produzindo benefícios reais e mensuráveis relacionados à mitigação das mudanças climáticas.

## 6. CONCLUSÕES

Dos resultados deste trabalho, conclui-se que:

- Ainda é bastante incipiente a participação da biomassa florestal como fonte de energia termelétrica, representando apenas 0,26% da oferta interna de energia do Brasil;
- O dimensionamento de uma usina termelétrica de pequeno a médio porte para a microrregião de Viçosa, MG, pode ser um atrativo do ponto de vista de aproveitamento de mercado: todos os projetos simulados foram capazes de demandar uma porção razoável do maciço florestal existente nessa região, sendo que o maior projeto (UTE C) pode demandar 25,1% da média de plantios tomada como base no estudo;
- Variações nos parâmetros florestais, principalmente no teor de umidade dos lotes de cavacos, afetam diretamente a operação de uma usina termelétrica e sua economicidade;
- Caso o investidor opte por participar apenas do ambiente regulado, as análises demonstraram que a geração termelétrica com biomassa florestal pode ser feita a preços competitivos, com ICB dentro da média dos últimos vencedores dos leilões de energia nova, remuneração fixa justa ao investidor e risco nulo;
- O nível de inflexibilidade é uma variável essencial para a seleção e análise de projetos termelétricos a biomassa florestal;
- A alternativa de maior retorno relativo para o projeto estudado foi a estratégia de participar apenas no mercado livre, com maior Valor Presente Líquido (R\$ 7,7 milhões) e maior TIR (20,4% a.a.). No entanto,

participar apenas do mercado livre traz consigo elevado risco e alto grau de dispersão da distribuição.

- Participar concomitantemente dos dois ambientes (livre e regulado) levou a resultados econômicos satisfatórios e com maior mitigação dos riscos se comparado à participação apenas no mercado livre.

- O crescimento da participação da biomassa florestal no mercado de energia elétrica depende fortemente da adequação de critérios dos leilões de energia para a biomassa florestal, por parte do governo, bem como da maior qualidade e integração dos projetos, por parte dos investidores e produtores florestais.

- O estímulo a novos projetos de energia de biomassa florestal tem potencial de gerar impactos econômicos, sociais e ambientais, com crescimento e diversificação de renda no meio urbano e rural, geração de emprego, tributação e endereçamento de questões ambientais.

- A microrregião de Viçosa, MG, pode ser beneficiada com a implantação de projetos de energia utilizando a biomassa florestal existente e subutilizada da região, com potencial para geração de empregos e renda.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, T. M. et al. Reorganização socioeconômica no extremo sul da Bahia decorrente da introdução da cultura do eucalipto. **Sociedade e Natureza**, v. 20, n. 2, p. 5–18, 2008.

(ANEEL), Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL. Brasília: ANEEL, 2015, p. 24.

\_\_\_\_\_. *Banco de Informações de Geração*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

BARROS, D.M.; VASCONCELOS, E.C. Termelétricas a Lenha. In: MELLO, M.G. (Ed). **Biomassa: Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001, p. 221-241.

BATISTA, F.R.S. et al. Assessing investment analysis of wind power generation projects in Brazil. 19th Power System Computation Conference, Genoa, Itália, 2016.

BATISTA, F. R. S. et al. O sistema ANAFIN para realização de análises de viabilidade econômico-financeira de projetos de geração e transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro: CEPEL. 2017.

BLASELBAUER, H. Combustão de madeira e controle de poluição em cerâmicas. **Revista Novacer**, n. 5, 2010.

BRASIL, Câmara Setorial da Cadeia Produtiva de Florestas Plantadas. **Produção de energia a partir da biomassa de madeira**. Apresentação em 14 de junho de 2017. Brasília: 2017.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **IPEF - Estudos Avançados** 21, v. 21, n. 59, p. 185–193, 2007.

BRITO, J. O.; CINTRA, T. C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão estratégica e demanda de ações. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 157–163, 2004.

CALIXTO, J. S. et al. Trabalho, terra e geração de renda em três décadas

de reflorestamentos no alto Jequitinhonha. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, n. 2, p. 519–538, 2009.

CARNEIRO, A. C. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375–381, 2014.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Conversão direta da madeira em calor e energia. In: SANTOS, F. (Ed.). . **Bioenergia e Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais**. 1.2013 ed. Viçosa: Os Editores, 2013. p. 355–378.

(CCEE), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Regras de Comercialização** - Receita de Venda de CCEAR. Brasília: CCEE, 2015.

\_\_\_\_\_. *CCEE: Quem somos*. Disponível em:

<[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/quem-somos](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos)>.

Acesso em: 23 mar. 2017a.

\_\_\_\_\_. *CCEE: Onde atuamos*. Disponível em:

<[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/setor\\_eletrico](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/setor_eletrico)>. Acesso em: 28 mar. 2017b.

\_\_\_\_\_. *Resultados consolidados leilões de energia*. Disponível em:

<[https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos\\_menu\\_lateral/leiloes](https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/leiloes)>

. Acesso em: 01 fev. 2018.

(CEPEL) Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. *ANAFIN: programa para análise financeira de projetos elétricos*. Disponível em:

<<http://www.cepel.br/produtos/anafin-programa-para-analise-financeira-de-projetos-eletricos.htm>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

CORTEZ, L. A.; LORA, E. E.; GÓMES, E. O. **Biomassa para Energia**. Editora Unicamp, 2008. v. 1

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Produção de florestas energéticas. In: SANTOS, F. ET AL. (Ed.). . **Bioenergia e Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais**. Viçosa: Os Editores, 2013. p. 298–319.

DINIZ, A.L. et al. Hydro Plants Energetic Production Function Improvement in a Hydrothermal System Mid-Term Operation Planning

Model. In: EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro. EngOpt2008 - Proceedings (CD). 2008.

DOBIE, P.; SHARMA, N. Trees as a Global Source of Energy : from fuelwood and charcoal to pyrolysis-driven electricity generation and biofuels. **World Agroforestry Centre**, 2015.

(EPE), Empresa de Pesquisa Energética. **Índice de Custo Benéfico (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica** - Metodologia de Cálculo. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

\_\_\_\_\_. **Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2014

\_\_\_\_\_. **Informe Técnico - Parcela da Receita Fixa Vinculada ao Custo de Combustível na Geração Inflexível de Usinas Termelétricas**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

\_\_\_\_\_. **Energia Termelétrica: Gás natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: EPE, 2016a

\_\_\_\_\_. **Balanço Energético Nacional 2016 (ano base 2015)**. Rio de Janeiro: EPE, 2016b.

\_\_\_\_\_. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016c.

\_\_\_\_\_. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016d.

\_\_\_\_\_. **Informe Técnico: Habilitação Técnica para o Leilão A-6 de 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2017

ESPOSITO, A. S. O setor elétrico brasileiro e o BNDES: reflexões sobre o financiamento aos investimentos e perspectivas. In: SOUSA, F. L. (Ed.). . **BNDES 60 anos: perspectivas setoriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: BNDES, 2012. p. 384.

FOELKEL, C. **Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade**. Parte 2: geração de calor, vapor e

- eletricidade. Celsius Degree. 2016.
- GURGEL, H. C. et al. Unidades de conservação e o falso dilema entre conservação e desenvolvimento. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 3, p. 109–119, 2009.
- HUGOT, E. Producción de Vapor. In: CONTINENTAL, C. E. (Ed.). **Manual para ingenheiros azucareros**. 4. ed. México: 1976. p. 603–705.
- (IAB), INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir de madeira no Brasil**. Out. 2015.
- (IBÁ), Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2016**, São Paulo: 2016. Disponível em: <[www.iba.org](http://www.iba.org)>.
- (IBÁ), Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2017**, São Paulo: 2017. Disponível em: <[www.iba.org](http://www.iba.org)>.
- (IBGE), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura: PEVS**. v. 30, p. 1–48, 2015.
- JESUS, M. S. de et al. Caracterização energética de diferentes espécies de eucalyptus. **Revista Floresta**, v. 47, n.1, p. 11-16, 2017.
- KHATIWADA, D. et al. Power generation from sugarcane biomass - A complementary option to hydroelectricity in Nepal and Brazil. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 241–254, 2012.
- LAMAS, W. DE Q.; GIACAGLIA, G. E. O. The Brazilian energy matrix: Evolution analysis and its impact on farming. **Energy Policy**, v. 63, p. 321–327, 2013.
- LIPPEL. *Website LIPPEL*. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/categorias/processamento/picadores-de-madeira/picadores-florestais-a-disco>>. Acesso em: 6 jul. 2017.
- LOSEKANN, L. Impactos da crise elétrica e as próximas páginas do setor elétrico brasileiro. **Infopetro Wordpress**, p. 3, jun. 2014.
- MACEDO, I. C. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia**. Brasília: 2003
- MACEIRA, M. E. P. et al. Ten years of application of stochastic dual

dynamic programming in official and agent studies in Brazil description of the NEWAVE program. In: 16th Power Systems Computation Conference, Glasgow. 2008.

MACEIRA, M. E. P. et al. Chain of optimization models for setting the energy dispatch and spot price in the Brazilian system. In: Proc. 2002 Power Systems Computation Conference, Sevilla, Espanha, 2002.

MACHADO, E. F. **O IDH e as atividades de plantio de florestas**, 2004.

MARZANO, G. L. B. et al. Avaliação econômico-financeira de empreendimentos de geração termoelétrica no âmbito do modelo institucional do setor elétrico brasileiro. **XXXIX SBPO**. Fortaleza, CE. p. 475–486, 2007.

MIRANDA, M. D. Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial, MG. Viçosa, 2015. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa.

MIRANDA, M. A. S. et al. Eucalyptus sp. woodchip potential for industrial thermal energy production. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, 30 nov. 2017.

MÜLLER, M. D. Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG. Viçosa, 2005. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa.

NAIR, P. K. R. et al. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems : a feasibility appraisal. **Environmental Science and Policy**, v. 12, p. 1099–1111, 2009.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica**. Botucatu, 2007. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista.

NASCIMENTO, M. D.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica. **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104–117, 2010.

PAYN, T. et al. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57–67, 2015.

PELKONEN, P. et al. **Biomass production: impacts on other ecosystem services**. European Forest Institute, 2014.

PINTO JR., H. Q. et al. **Economia da Energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. 5. ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2007.

POTTMAIER, D. et al. The Brazilian energy matrix: From a materials science and engineering perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 678–691, 2013.

QUIRINO, F. W. et al. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173–182, 2004.

RIBEIRO, G. B.; VALVERDE, S. R. Breve elucidação sobre os leilões de energia e o potencial da biomassa florestal. **Revista Madeira**, v. 1, p. 43–46, 2016.

RODRIGUES, M. L. de M. *Estudo técnico-econômico da implantação da cogeração em pequena escala a biomassa em uma indústria*. Belo Horizonte, 2009. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262–2289, 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 Paranaity*. Maringá, 2010. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas.

SILVA, J. DE C. **Manual prático do fazendeiro florestal: produzindo madeira com qualidade**. 3. ed. Viçosa, MG: 2011.

SOUZA, R. T. G. Análise de viabilidade técnica-econômica do uso do palhiço , para fins de cogeração de energia , pela rota colheita integral. Campinas, 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de

Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

VALVERDE, S. R.; RENTE, J.; VALVERDE, E. **Estratégias e mecanismos de abastecimento da indústria de base florestal.**

SEBRAE, 2014.

VIDAL, A. C. F.; Da HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **Papel e Celulose**, p. 261–314, 2011.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C.; PEREIRA, B. L. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F. (Ed.). . **Bioenergia e Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais.** Viçosa: Os Editores, 2013. p. 322–354.

WIECHETECK, M. Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. MME: Relatório projeto PNUD BRA 00/20 - apoio às políticas públicas na área de gestão e controle ambiental. p. 40, 2009.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Relação das Usinas Termelétricas a Resíduos Florestais em operação:

Quadro 4: UTEs a resíduos florestais em operação, conforme dados do BIG

Usina	Data Operação	Potência (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município	Estado
Ripasa	01/06/1974	53.480	APE	100% para Suzano Papel e Celulose S.A.	Limeira - SP	SP
Tramontina	01/03/1998	1.500	REG	100% para Tramontina Belém S.A.	Belém - PA	PA
Madem	-	1.000	REG	100% para Madem S/A Indústria e Comércio de Madeiras e Embalagens	Mostardas - RS	RS
Rigesa	14/08/2009	32.500	APE	100% para Rigesa Celulose Papel e Embalagens Ltda	Três Barras - SC	SC
Central Termelétrica de Geração (Antiga Forjas)	09/03/2000	1.800	REG	100% para Forjasul Encruzilhada Indústria de Madeiras Ltda.	Encruzilhada do Sul - RS	RS
Sinop	-	6.000	APE	100% para Vitale Industrial Norte S.A	Sinop - MT	MT
Sguário Itapeva	15/10/2008	2.708	REG	100% para Sguário Indústria de Madeiras Ltda	Nova Campina - SP	SP
Miguel Forte	18/04/1998	16.000	PIE	100% para Miguel Forte Industrial S.A. - Papéis e Madeiras	União da Vitória - PR	PR
Energia Madeiras	04/12/2008	4.000	REG	100% para Energia Madeiras – Industrial e Comercial Ltda.	Canoinhas - SC	SC
Pizzatto	28/06/2001	2.000	REG	100% para Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda	General Carneiro - PR	PR
Piratini	26/01/2003	10.000	PIE	100% para Piratini Energia S.A	Piratini - RS	RS
Ecoluz	07/11/2008	12.330	PIE	100% para ASPERBRAS ENERGIA LTDA	Guarapuava - PR	PR
Itacoatiara	30/10/2002	9.000	PIE	100% para BK Energia Itacoatiara Ltda	Itacoatiara - AM	AM
Pampa	25/09/2001	550	REG	100% para Pampa Exportações Ltda	Belém - PA	PA
Fazenda Santa Marta	-	3.600	REG	100% para Rio Rancho Agropecuária S.A	Grão Mogol - MG	MG
Araguassu	21/08/2002	1.200	REG	100% para Araguassu Óleos Vegetais Indústria e Comércio Ltda	Porto Alegre do Norte - MT	MT
Gaseifamaz I	20/05/2003	27	REG	100% para Biomass Users Network do Brasil	São Paulo - SP	SP
Gaseifamaz II	-	27	REG	100% para Biomass Users Network do Brasil	Manaus - AM	AM
Chapecó	-	4.000	REG	100% para Sadia S.A	Chapecó - SC	SC
Lages	23/12/2003	28.000	PIE	100% para Lages Bioenergética Ltda	Lages - SC	SC
Dois Vizinhos	30/06/2003	3.000	REG	100% para Sadia S.A	Dois Vizinhos - PR	PR
Rohden	04/02/2003	3.500	REG	100% para Rohden Artefatos de Madeira Ltda	Salete - SC	SC
Egídio	01/08/1997	2.000	REG	100% para Serraria Egídio Ltda	Juruena - MT	MT
Battistella	01/04/1992	3.150	REG	100% para Battistella Indústria e Comércio Ltda	Rio Negrinho - SC	SC
Terranova I	09/02/2000	3.000	REG	100% para Solida Brasil Madeiras Ltda	Rio Negrinho - SC	SC
Irani	22/10/2004	10.000	APE	100% para CELULOSE IRANI SA	Vargem Bonita - SC	SC
Bragagnolo	02/01/2001	1.200	REG	100% para AVELINO BRAGAGNOLO S A INDUSTRIA E COMERCIO	Faxinal dos Guedes - SC	SC
Pirai	01/04/2006	9.000	PIE	100% para Centrais Elétricas Salto Correntes Ltda	Pirai do Sul - PR	PR

(continuação)

Energy Green	28/08/2008	5.000	REG	100% para E G Brasil Energia Ltda.	Carambeí - PR	PR
Santa Maria	26/11/2009	6.400	APE	100% para Santa Maria Companhia Papel e Celulose	Guarapuava - PR	PR
Nortao	10/01/2011	1.275	REG	100% para USINA TERMELETRICA NORTAO LTDA - EPP	Aripuanã - MT	MT
Bio Fuel	08/10/2008	4.800	REG	100% para Brasil Bio Fuels S.A.	São João da Baliza - RR	RR
Berneck	-	12.000	PIE	100% para Berneck S.A, Painéis e Serrados	Araucária - PR	PR
Thermoazul	05/03/2009	4.700	REG	100% para Thermoazul - Usina de Energia Ltda.	Tangará - SC	SC
Primavera do Leste	30/12/2009	8.000	APE	100% para Cargill Agrícola S.A.	Primavera do Leste - MT	MT
Comigo	01/04/2008	5.000	REG	não identificado	Carmo do Rio Verde - GO	GO
Natureza Limpa	16/12/2009	1.000	REG	100% para TJMC Empreendimentos Ltda.	Unai - MG	MG
Laminados Triunfo	15/06/2007	1.500	REG	100% para Laminados Triunfo Ltda.	Rio Branco - AC	AC
Santo Antônio	30/05/2010	60	REG	100% para Cooperativa de desenvolvimento Sustentável Santo Antônio do rio Itaqu	Breves - PA	PA
Cargill Uberlândia	10/09/2011	25.000	APE	100% para Cargill Agrícola S.A.	Uberlândia - MG	MG
Ebata	20/09/2011	800	REG	100% para Ebata – Produtos Florestais Ltda	Belém - PA	PA
Guaçu	17/05/2013	30.000	PIE	100% para Guaçu Geração de Energia S.A	Aripuanã - MT	MT
ERB Candeias	31/10/2014	16.790	PIE	100% para ERB Aratinga S.A	Candeias - BA	BA
Cargil Três Lagoas	17/07/2013	6.000	APE	100% para Cargill Agrícola S.A.	Três Lagoas - MS	MS
Juruá Florestal	18/06/2013	400	REG	100% para Juruá Florestal Ltda	Ananindeua - PA	PA
Atos	25/04/2014	3.000	REG	100% para Atos Geração de Energia Ltda	Nova Bandeirantes - MT	MT
Martins	10/05/2004	2.000	REG	100% para USIMART – Usina Termoeletrica Martins Ltda - EPP	Colniza - MT	MT
Floraplac	27/08/2015	20.000	PIE	100% para FLORAPLAC MDF LTDA	Paragominas - PA	PA
CATIVA I	01/03/2015	1.200	REG	100% para Cativa Beneficiamentos Texteis Ltda.	Apiúna - SC	SC
Rações Patense - Itaúna	01/06/2015	3.000	REG	100% para Indústria Rações Patense Ltda.	Itaúna - MG	MG
F&S Agri Solutions	09/09/2017	18.000	APE	100% para FS AGRISOLUTIONS INDUSTRIA DE BIOCMBUSTIVEIS LTDA	Lucas do Rio Verde - MT	MT
Lanxess Cogeração	10/03/2010	4.500	REG	100% para LANXESS - INDUSTRIA DE PRODUTOS QUIMICOS E PLASTICOS L	Porto Feliz - SP	SP
Iguaçu-Ibicuí-Termo-1-2-4	01/01/1970	3.100	REG	100% para Iguaçu Celulose S/A	Campos Novos - SC	SC
Berneck Curitibaos	01/07/2015	14.300	APE	100% para Berneck S.A, Painéis e Serrados	Curitibaos - SC	SC
SORGATTO	20/11/2017	3.000	REG	100% para AGROPECUARIA SORGATTO LTDA	Cristalina - GO	GO

Fonte: Banco de Informações de Geração (BIG – ANEEL), em 02 de fevereiro de 2018.

## 8.2. Usinas Termelétricas a cavaco do Ambiente de Contratação Regulada

Quadro 5: UTEs a cavaco de madeira do ACR

UTE	Leilão	Data de realização do leilão	Tipo de Leilão	UF	Potência (MW)	Garantia Física (MW médio)	Preço de Venda (ou ICB, em R\$/MWh)	Preço de venda atualizado (R\$/MWh)	Data Início Suprimento	Tipo de Contrato	Status	Receita Fixa (R\$/ano)	Total energia contratada (MWh)	Receita Fixa / Energia contratada (R\$/ano/MWh)	Investimentos (R\$)	Inv/Pot (R\$/kW inst.)
CISFRAMA (Energia Madeiras)	02ºLEN	29/06/06	Energia Nova	SC	4,0	2,3	133,92	255,75	01/01/2009	Disponibilidade	Em operação	1.475.999,97	262.944,00	5,61	-	-
GUAÇU GERAÇÃO DE ENERGIA S/A	04ºLER	18/08/11	Reserva	MT	30,0	25,5	101,99	150,26	01/07/2014	Quantidade	Em operação	-	2.629.800,00	-	86.735.000,00	4.259,40
CANTO DO BURITI	16ºLEN	29/08/13	Energia Nova	PI	150,0	119,1	136,69	180,36	01/01/2018	Disponibilidade	Em construção	-	26.100.050,40	-	469.407.000,00	4.129,27
CGB (Campo Grande)	16ºLEN	29/08/13	Energia Nova	BA	150,0	122,1	136,69	180,36	01/01/2018	Disponibilidade	Em construção	-	26.757.482,40	-	496.407.000,00	4.366,79
ERB Candeias	18ºLEN	13/12/13	Energia Nova	BA	17,0	14,9	135,49	174,59	01/05/2018	Disponibilidade	Em operação	8.278.142,09	3.222.318,70	2,57	38.400.000,00	2.910,69
YTI (Costa Rica I)	20ºLEN	28/11/14	Energia Nova	MS	164,0	135,1	207,32	253,02	01/01/2019	Disponibilidade	Em construção	158.101.000,00	24.105.840,00	6,56	860.940.000,00	6.406,89
YPE (Acre)	20ºLEN	28/11/14	Energia Nova	AC	164,0	135,1	206,90	252,51	01/01/2019	Disponibilidade	Em construção	157.700.000,00	24.105.840,00	6,54	860.940.000,00	6.406,89
BOLT	21ºLEN	30/04/15	Energia Nova	BA	50,0	41,4	272,01	315,02	01/01/2020	Disponibilidade	Em construção	68.631.516,09	9.073.555,20	7,56	227.561.000,00	5.270,88
SUZANO (Unidade Imperatriz)	15ºLEE	11/12/15	Energia Existente	MA	255,0	96,9	129,50	141,70	01/01/2016	Disponibilidade	Em operação	20.422.233,05	473.472,00	-	-	-
SUZANO (Unidade Imperatriz)	15ºLEE	11/12/15	Energia Existente	MA	255,0	96,9	144,98	158,64	01/01/2016	Disponibilidade	Em operação	38.106.000,00	263.520,00	-	-	-
ELDORADO (Onça Pintada)	23ºLEN	29/04/16	Energia Nova	MS	50,0	43,1	243,21	257,75	01/01/2021	Disponibilidade	Em construção	60.500.000,00	8.349.386,40	7,25	292.400.000,00	6.197,70
PREDILECTA	23ºLEN	29/04/16	Energia Nova	SP	5,0	4,5	199,00	210,90	01/01/2021	Disponibilidade	Em construção	3.751.000,00	745.089,60	5,03	30.019.640,00	6.362,96
CAMBARA	26ºLEN	20/12/17	Energia Nova	RS	50,0	46,1	218,43	218,43	01/01/2023	Disponibilidade	Em construção	62.715.731,00	9.883.394,40	6,35	-	-

Fonte: Resultados Consolidados Leilões de Energia (CCEE – Janeiro/2018).

### 8.3. Estatísticas dos casos em que a usina está parcialmente contratada nos dois mercados

Tabela 19: Principais estatísticas estimadas de cada caso.

Estatísticas	Caso 25% ACL / 75% ACR		Caso 50% ACL / 50% ACR		Caso 75% ACL / 25% ACR	
	VPL (MM R\$)	TIR (%a.a.)	VPL (MM R\$)	TIR (%a.a.)	VPL (MM R\$)	TIR (%a.a.)
<b>Média [MMR\$]</b>	1,73	17,89%	4,21	21,84%	6,69	25,62%
<b>D.P. [MMR\$]</b>	0,44	0,70%	0,88	1,28%	1,32	1,82%
<b>Coef. Var. VPL's [%]</b>	25,35	3,90	20,86	5,88	19,70	7,10
<b>Coef. Var. Média VPL's [%]</b>	0,57	0,09	0,47	0,13	0,44	0,16
<b>Prob. (VPL&lt;0) [%]</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Perc (1%) [MMR\$]</b>	0,86	16,43%	2,46	19,03%	4,06	21,50%
<b>Perc (5%) [MMR\$]</b>	1,03	16,73%	2,80	19,65%	4,57	22,46%
<b>Perc (10%) [MMR\$]</b>	1,17	16,97%	3,08	20,13%	4,99	23,17%
<b>Perc (20%) [MMR\$]</b>	1,33	17,25%	3,41	20,70%	5,49	24,00%

Fonte: Resultados da Pesquisa.

## 8.4. Dados técnicos dos projetos termelétricos

Quadro 6: Dados técnicos dos projetos termelétricos

Dados	UTE A	UTE B	UTE C	Unidade
Vazão de vapor	26.250,00	40.000,00	80.000,00	kg/h
Pressão	45,00	70,00	70,00	bar (a)
Vapor Saturado	0	0	0	1=sim; 0=não
Vapor Superaquecido	1	1	1	1=sim; 0=não
Temperatura Super	495,00	495,00	495,00	°C
PCU Combustível	2.750,20	2.750,20	2.750,20	kcal /kg
Entalpia vapor	3.399,10	3.399,10	3.399,10	kJ/kg
Entalpia vapor	811,86	811,86	811,86	kcal /kg
Entalpia água	105,00	105,00	105,00	kcal /kg
Eficiência caldeira	80,75%	85,00%	89,25%	
Energia Líquida	17.715.863,23	28.274.481,81	56.548.963,62	kcal/h
Energia Líquida	20.603,55	32.883,22	65.766,44	kW
Energia total	25.515,23	38.686,14	73.687,89	kW
Energia total	21.939.149,51	33.264.096,25	63.360.183,33	kcal/h
kg gases / kg combustível	6,10	6,10	6,10	-
kg ar/kg gas	0,85	0,85	0,85	-
Consumo combustível	7.977,29	12.095,16	23.038,39	kg/h
Densidade a granel	272,91	272,91	272,91	kg/m <sup>3</sup>
Consumo combustível	29,23	44,32	74,43	m <sup>3</sup> /h
Energia gerada	5,83	8,89	17,78	MWh
Consumo cavaco	1.367,54	1.360,70	1.295,91	Kg/MWh
Consumo cavaco	1,37	1,36	1,30	Ton/MWh
Consumo cavaco	5,01	4,99	4,75	m <sup>3</sup> /MWh
Consumo cavaco	66.387,03	100.655,88	191.725,49	Ton/ano
Área floresta necessária	2.815,92	4.269,49	8.132,36	hectares (total)

Fonte: Resultados da pesquisa.