



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**GLAUCILEIDE FERREIRA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE RESÍDUOS DE  
MADEIRA DAS ESPÉCIES *Dinizia excelsa* Ducke E *Manilkara elata* (Allemão  
ex Miq.) Monach. PARA FINS ENERGÉTICOS**

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2017

**GLAUCILEIDE FERREIRA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE *PELLETS* DE RESÍDUOS DE MADEIRA DAS ESPÉCIES *Dinizia excelsa* Ducke E *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista  
Coorientadoras: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marina Donária Chaves Arantes e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Priscilla Távora Cabral.

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

F349v Ferreira, Glaucileide, 1980-  
Viabilidade técnica da produção de pellets de resíduos de madeira das espécies *Dinizia excelsa* Ducke e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. para fins energéticos / Glaucileide Ferreira. – 2017. 54 f. : il.

Orientador: Djeison Cesar Batista.  
Coorientador: Carla Priscila Távora Cabral ; Marina Donária Chaves Arantes.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Árvores. 2. Madeiras - Produtos. 3. Resíduos vegetais. 4. Amazônia. I. Batista, Djeison Cesar. II. Cabral, Carla Priscila Távora. III. Arantes, Marina Donária Chaves. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

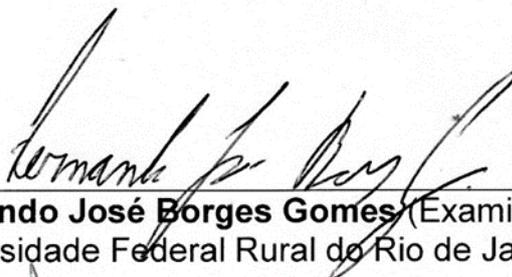
---

**VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE PELLETS DE RESÍDUOS DE  
MADEIRA DAS ESPÉCIES *Dinizia excelsa* Ducke E *Manilkara elata*  
(Allemão ex Miq.) Monach. PARA FINS ENERGÉTICOS**

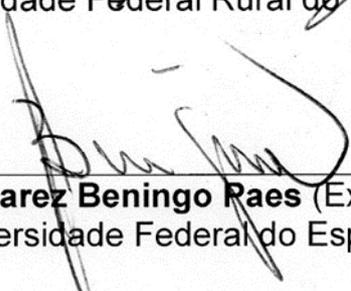
**Glaucileide Ferreira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

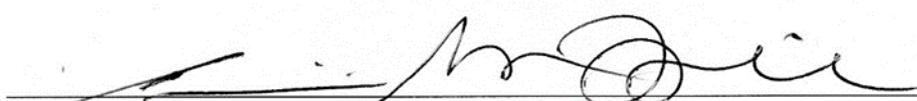
Aprovada em 25 de Julho de 2017.



**Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes** (Examinador externo)  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



**Prof. Dr. Juarez Beningo Raes** (Examinador interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo



**Prof. Dr. Djeison Cesar Batista** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

“Aquele que habita no abrigo do Altíssimo e descansa à sombra do Todo-poderoso pode dizer ao Senhor: ‘Tu és o meu refúgio e a minha fortaleza, o meu Deus, em quem confio’”.

Salmo 91:1-2.

Aos meus pais, José Antônio Ferreira e Antônia Severina Ferreira, pela vida, pelo enorme amor que nos foi dado e pela força de suportar as dificuldades que nos são impostas. À minha amada tia, Antônia Severina de Jesus, pelo amor com que cuidou de mim e dos meus irmãos.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter permanecido comigo nos momentos difíceis e não ter me deixado fraquejar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal. E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Djeison Cesar Batista pela amizade, carinho, paciência e pelo conhecimento compartilhado.

Às professoras Marina Donária Chaves Arantes e Carla Priscilla Távora Cabral pelas sugestões neste trabalho.

Ao Professor Juarez Benigno Paes, um verdadeiro pai para todos, serei eternamente grata. Ao Professor José Tarcísio da Silva Oliveira, pelo carinho e momentos de descontração.

Aos Técnicos de laboratório, José Geraldo Oliveira, Gilson Barbosa São Teago, Luciano Dias e Elecy Palácio Constantino, pelo carinho e pela ajuda na preparação do material e nas análises.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, da Universidade Federal de Viçosa, por abrir as portas do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira para a realização de algumas análises.

Às colegas da república, Márcia Carneiro e Stefânia Pimentel, pela convivência e por se tornarem minha família durante esses dois anos.

Aos amigos que fiz aqui, João Gabriel Missia da Silva, Jaily Kerller, Yonne Martinez, Luciana Ferreira da Silva, Daniela Minini, Ana Carla Bezerra de Lima, Joyce Almeida, Thaís Mendes Brito, Sandra Pires e Catherine Claros, levarei vocês sempre em meu coração.

Muito obrigada!

## RESUMO

FERREIRA, G. **VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE PELLETS DE RESÍDUOS DE MADEIRA DAS ESPÉCIES *Dinizia excelsa* Ducke E *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. PARA FINS ENERGÉTICOS.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Orientador: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista, Coorientadoras: Profa. Dra. Marina Donária Chaves Arantes e Profa. Dra. Carla Priscilla Távora Cabral.

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo e a utilização dos recursos madeireiros encontra-se entre as principais atividades econômicas na Região, gerando uma quantidade significativa de volume de resíduos que não têm sido aproveitados apropriadamente, acarretando prejuízo tanto financeiro quanto ambiental. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade técnica da produção de *pellets* com resíduos da madeira serrada das espécies *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) e *Manilkara elata* (maçaranduba) provenientes da Floresta Amazônica. Foram testadas 11 diferentes proporções de resíduos na produção de *pellets*, representados por composições puras (100%) de angelim-vermelho, maçaranduba e *Eucalyptus* sp., além de composições dessas espécies entre si. Para cada composição de resíduos, foram analisadas a composição química (teores de lignina total, extrativos totais e cinzas), algumas propriedades físicas (teor de umidade e densidade a granel) e térmicas (densidade energética e poder calorífico inferior). Para os *pellets*, foram realizadas as mesmas análises dos resíduos, além da composição química (teores de materiais voláteis e carbono fixo), algumas propriedades físicas (densidade aparente unitária, diâmetro e comprimento), térmicas (temperatura máxima de combustão) e mecânicas (compressão diametral, porcentagem de finos e durabilidade mecânica). Os resíduos de angelim-vermelho e maçaranduba foram tecnicamente viáveis para a produção de *pellets*. Todas as 11 composições de resíduos de angelim-vermelho, maçaranduba e eucalipto foram tecnicamente viáveis para a produção de *pellets*. Com base nos resultados de compressão diametral e durabilidade mecânica, as melhores composições de *pellets* foram 100% de angelim-vermelho, 50% de angelim-vermelho + 50% de maçaranduba e a composição mista, com 33,3% de cada uma das espécies testadas.

**Palavras-chave:** Angelim-vermelho, maçaranduba, peletização.

## ABSTRACT

FERREIRA, G. **TECHNICAL VIABILITY OF THE PRODUCTION OF PELLETS OF *Dinizia excelsa* Ducke E *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. WOOD WASTE FOR ENERGY PURPOSES.** 2017. Dissertation (Master's degree in Forest Sciences) –Espírito Santo Federal University, Jerônimo Monteiro – ES. Advisor: Prof. Dr. Djeison Cesar Batista, Coauthors: Profa. Dra. Marina Donária Chaves Arantes e Profa. Dra. Carla Priscilla Távora Cabral.

The Amazon rainforest is the largest tropical forest in the world and the use of wood resources is among the main economic activities in the Region, generating a significant amount of wood waste that has not been properly used, causing both financial and environmental damage. The aim of this work was to analyze the technical viability of the production of pellets of *Dinizia excelsa* and *Manilkara elata* sawmill's waste from the Amazon rainforest. For the pellets production we tested 11 proportions of wood waste, represented by pure compositions (100%) of *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata* and *Eucalyptus* sp., besides mixtures of these species among them. For every proportion, we analyzed the chemical composition (total lignin, extractives and ash), some physical properties (moisture content and bulk density) and thermal properties (energetic density and lower calorific value). For the pellets, we performed the same mentioned analyzes as for the wood waste and some more chemical analyzes (contents of volatile materials and fixed carbon), physical properties (unitary apparent density, diameter and length), thermal properties (maximum combustion temperature) and mechanical properties (diameter compression, percentage of fines and mechanical durability). The *Dinizia excelsa* and *Manilkara elata* wood waste were technically viable for the production of pellets. All 11 tested compositions of *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata* and *Eucalyptus* sp. wood waste were technically viable for the production of pellets. Based on the results of diametrical compression and mechanical durability, the best compositions of pellets were 100% *Dinizia excelsa*, 50% *Dinizia excelsa* + 50% *Manilkara elata* and the mixed composition, with 33.3% of each species tested.

**Keywords:** *Dinizia excelsa*, *Manilkara elata*, pellets production.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.2 HIPÓTESE .....	12
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 Objetivo geral .....	13
2.2 Objetivos específicos .....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
3.1 Amazônia brasileira e a produção de madeiras tropicais .....	14
3.2 <i>Dinizia excelsa</i> Ducke (angelim-vermelho) .....	14
3.3 <i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach. (maçaranduba) .....	15
3.4 Gênero <i>Eucalyptus</i> .....	16
3.5 Resíduos do desdobro de toras .....	17
3.6 Peletização da biomassa .....	18
3.7 Parâmetros de qualidade de <i>pellets</i> de resíduos florestais .....	20
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	22
4.1 Coleta dos resíduos de madeira na serraria .....	22
4.2 Análise dos resíduos de angelim-vermelho, maçaranduba e eucalipto .....	22
4.3 Produção e análise dos <i>pellets</i> .....	25
4.4 Análise estatística .....	29
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
5.1 Avaliação dos resíduos .....	31
5.2 Avaliação dos <i>pellets</i> .....	34
5.2.1 Teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo .....	34
5.2.2 Poder calorífico e temperatura máxima de combustão .....	35
5.2.3 Comparação entre resíduos e <i>pellets</i> .....	38
5.3 Propriedades físicas e mecânicas .....	39
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	43
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	44
<b>APÊNDICE</b> .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais da Floresta Amazônica têm sido utilizados em sua maioria por intermédio de Planos de Manejo Florestal Sustentável, em que a comercialização de produtos madeireiros tem sido uma das principais atividades econômicas da Região. Contudo, essa atividade tem gerado uma quantidade significativa de resíduos que não têm sido aproveitados apropriadamente, acarretando prejuízos financeiros e impactos ambientais.

No período de 2012 a 2014, de acordo com os dados da *Organización Internacional de las Maderas Tropicales* (OIMT, 2014), o Brasil foi o terceiro maior produtor e consumidor mundial de madeira tropical em toras. Foram consumidos, em média, 15,8 milhões de m<sup>3</sup> por ano, mantendo um nível relativamente elevado comparado a outros países, ficando atrás somente de Indonésia e Índia.

De acordo com Hummel et al. (2010), o volume de madeira não aproveitado pela indústria madeireira na Amazônia em 2009 foi de 8,4 milhões de m<sup>3</sup>. Desse total, 16% são representados por resíduos de maior dimensão (aparas, refilos e destopos) e 9% correspondem a serragem, que poderia ser utilizada na peletização. Contudo, ambos os tipos de resíduos são comumente destinados a queima direta, sem aproveitamento da energia, ou depositados sem qualquer aproveitamento.

Nas serrarias, apenas 35% a 40% do volume das toras desdobradas é transformado em madeira serrada, sendo o restante considerado resíduo. Em alguns casos, o volume de resíduo gerado por tora chega a 80%, um valor inaceitável considerando as preocupações ambientais e o aproveitamento econômico da matéria-prima (FEITOSA, 2008).

Os resíduos gerados pela indústria madeireira, quando dispostos de forma inadequada, constituem uma ameaça para o ambiente. Porém, podem ser utilizados de maneira alternativa para aumentar as receitas das indústrias madeireiras, como as serrarias, por exemplo (FRANCESCHINI, 2004).

A utilização de resíduos de madeira tem contribuído para a racionalização do aproveitamento dos recursos florestais. A transformação desses resíduos em um produto fácil de manusear, armazenar, transportar e utilizar, é uma forma de oferecer uma alternativa socioeconômica às empresas, além de contribuir para a adequação ambiental do gerenciamento de resíduos sólidos industriais. Uma das alternativas é

a transformação desses resíduos de madeira em *pellets*, pois são considerados uma fonte de energia renovável, limpa e eficiente, caracterizando um combustível sólido que gera pouca fumaça e libera menos monóxido e dióxido de carbono do que qualquer combustível fóssil (CARVALHO, 2011).

Apesar de haver pesquisas a respeito da utilização de resíduos de madeira de florestas plantadas, como o eucalipto e o pinus (GARCIA, 2013), e resíduos agrícolas (DIAS et al., 2012) na produção de *pellets*, o mesmo não pode ser mencionado para os resíduos de espécies oriundas de florestas tropicais. Caso estes resíduos madeireiros fossem utilizados na produção de energia renovável, tais como a produção de *pellets* e briquetes, isso poderia atrair investimentos para a Região Amazônica. Além da matéria-prima, o Brasil dispõe de tecnologia de produção de queimadores industriais e caldeiras para a geração de energia, o que também contribuiria para a oferta energética do País.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A quantidade de resíduos produzidos nas serrarias é grande, podendo atingir até 80% do volume das toras desdobradas. Atualmente, os resíduos produzidos nas serrarias brasileiras têm pouco ou nenhum valor agregado.

A madeira de florestas nativas é um recurso natural valioso, porém tem uma utilização pouco eficiente, em que grande parte do volume é desperdiçado ou transformado em resíduos, desde a colheita até o produto final. Com base nessas premissas, levantou-se o seguinte problema de pesquisa: existe viabilidade técnica para a produção de *pellets* com resíduo produzido em serrarias que desdobram madeira tropical?

## 1.2 HIPÓTESE

A hipótese inicial para o problema de pesquisa é que haverá viabilidade técnica para a produção dos *pellets* com resíduos de *Dinizia excelsa* e *Manilkara elata*, que são espécies nativas da Amazônia brasileira, em que a qualidade dos *pellets* atenderá aos padrões de qualidade internacionais vigentes.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade técnica da produção de *pellets* com resíduos da madeira serrada das espécies *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) e *Manilkara elata* (maçaranduba) provenientes da Floresta Amazônica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Avaliar 11 composições de resíduos de madeira serrada e *pellets* de angelim-vermelho e maçaranduba, com a adição de resíduos de *Eucalyptus* sp.
- ✓ Analisar a influência da composição química (teores de lignina total, extrativos totais e cinzas) e de algumas propriedades físicas (teor de umidade e densidade a granel) e térmicas (densidade energética e poder calorífico inferior) dos resíduos na produção de *pellets*.
- ✓ Comparar o poder calorífico inferior, a densidade a granel e a densidade energética entre resíduos e *pellets*.
- ✓ Verificar a qualidade dos *pellets* de acordo com a composição química (teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas), algumas propriedades físicas (teor de umidade, densidade a granel, densidade aparente unitária, diâmetro e comprimento), térmicas (poder calorífico inferior, densidade energética e temperatura máxima de combustão) e mecânicas (compressão diametral, porcentagem de finos e durabilidade mecânica).
- ✓ Classificar algumas propriedades dos *pellets* (teor de umidade, diâmetro, comprimento, densidade a granel, teor de cinzas, porcentagem de finos e durabilidade mecânica) de acordo com a EN 14961-6, *Deutsches Institut für Normung*.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 AMAZÔNIA BRASILEIRA E A PRODUÇÃO DE MADEIRAS TROPICAIS

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de madeira tropical (WAAK, 2013) e a principal Região fornecedora do País é a Amazônica. Para a Organização Internacional de Madeiras Tropicais (OIMT, 2013), essa região tem se caracterizado como uma das principais produtoras de madeira tropical no mundo, com a produção de madeira em tora concentrada principalmente nos estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso.

A cadeia produtiva da madeira tropical tem grande importância, pois gera aproximadamente 400 mil empregos na Região Amazônica, em que o manejo adequado representa alternativa à exploração irracional da floresta (LENTINI, 2008) e, simultaneamente, garante a sustentabilidade da atividade (BARROS; VERÍSSIMO, 2002). De fato, a melhor forma de conservar a floresta é utilizar seus recursos de forma consciente e planejada.

De acordo com os dados da *International Tropical Timber Organization* (ITTO, 2014), no ano de 2011 à 2014 o Brasil manteve sua produção por volta de aproximadamente 30,8 milhões de metros cúbicos de madeiras tropicais em toras ficando atrás no ranking mundial apenas da Indonésia que produziu cerca de 62,4 milhões de metros cúbicos e a Índia com produção de aproximadamente 42 milhões de metros cúbicos no período de 2014.

#### 3.2 *Dinizia excelsa* Ducke (ANGELIM-VERMELHO)

O angelim-vermelho é uma espécie do gênero *Dinizia*, pertence à família Fabaceae, tem ocorrência na Região Amazônica nos estados do Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá. Pode atingir 60 metros de altura e, por seu tamanho e ocorrência, contribui para a biomassa da floresta (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004).

A madeira de angelim-vermelho possui cerne marrom-avermelhado claro, diferindo pouco do alburno (cinza-avermelhado), os anéis de crescimento são distintos, grã reversa (entrecruzada), textura média, brilho moderado e cheiro

desagradável (SOUZA; MAGLIANO; CAMARGOS, 1997). Ainda sobre a anatomia, o parênquima axial é visível a olho nu, predominantemente aliforme, formando arranjos oblíquos ou eventualmente em faixas marginais. Os raios são pouco visíveis a olho nu na face transversal e pouco distintos, mesmo sob lente, na face tangencial, não estratificados. Os poros são visíveis a olho nu, com frequência de poucos a numerosos (até 24/mm<sup>2</sup>), solitários e múltiplos radiais, obstruídos por uma substância avermelhada.

A madeira é pesada, de densidade aparente igual 990 kg/m<sup>3</sup> (12%), densidade saturada igual a 1.260 kg/m<sup>3</sup>, com tendência moderada ao torcimento médio e a leve colapso. Tem boa resistência ao ataque de fungos, térmitas e insetos de madeira seca e é empregada na construção civil e naval, dormentes, postes e peças torneadas (SOUZA; MAGLIANO; CAMARGOS, 1997). A espécie vem se destacando nos últimos anos por ser uma das mais empregadas pelo segmento madeireiro nos estados do Amazonas e Pará (BARAÚNA, 2011).

### 3.3 *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. (MAÇARANDUBA)

A maçaranduba é a espécie mais conhecida do gênero *Manilkara* e outras variações do seu nome são: maçaranduba-amarela, maçaranduba-de-leite, maçaranduba-mansa, maçaranduba-preta, maçaranduba-verdadeira e paraju (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004). Tem ocorrência na Região Amazônica, particularmente na mata pluvial de terra firme e também ocorre no sul da Venezuela e Guianas (LORENZI, 2002). Conforme citado pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA, 1991), a maçaranduba é uma das árvores da Região Amazônica que atinge maior porte, podendo chegar até 50 m de altura e diâmetros entre 60 a 120 cm.

A madeira tem cerne com coloração vermelho arroxeadado, com tendência a se tornar vermelho escuro quando em serviço, cerne distinto do alburno, que é castanho claro; possui textura fina e uniforme, brilho médio, grã usualmente direita, com cheiro e gosto imperceptíveis (INPA, 1991). Anatomicamente, possui parênquima axial visível somente sob lente (10x), em linhas; raios visíveis somente sob lente (10x) nas seções transversal e tangencial, não estratificados; canais secretores radiais ausentes, pouco contrastado em seção radial; poros visíveis somente sob lente (10x),

difusos, arranjo com padrão indefinido, predominantemente múltiplos de dois, conteúdo ausente; placa de perfuração simples; linhas vasculares retilíneas em seção tangencial (CHIPPAIA et al., 2015).

É uma madeira considerada de alta densidade (1,04 g/cm<sup>3</sup>), com elevada retrabilidade volumétrica, resistência mecânica de média a alta, e elevada resistência ao ataque de fungos e cupins (INPA, 1991). Essas características fazem com que a espécie seja uma das mais exploradas na Região Amazônica, sendo imprescindível conhecer o seu comportamento para possibilitar a aplicação de um manejo adequado e, assim, garantir a sua conservação na estrutura florestal (CASTRO; CARVALHO, 2014).

### 3.4 O GÊNERO *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é conhecido por sua grande variabilidade genética e é utilizado para inúmeras finalidades, uma vez que a diversidade de espécies possibilita propriedades físicas e químicas diferentes (PEREIRA et al., 2000). É o gênero florestal mais utilizado no Brasil em programas de reflorestamento, em razão de suas características de rápido crescimento, boa adaptação às condições edafoclimáticas e seu sucesso se deve aos avanços nos estudos na área de melhoramento genético florestal (CHAVES et al., 2013; SANTOS et al., 2010).

O uso da madeira de eucalipto para obtenção de polpa celulósica, carvão vegetal e madeira serrada motivou inúmeros projetos de pesquisa e desenvolvimento que conferiram ao eucalipto altas taxas de produtividade e qualidade da madeira (DOSSA et al., 2002). As espécies de eucalipto mais utilizadas para a produção de carvão vegetal são o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla*, assim como seus híbridos (SANTOS, 2010).

O conhecimento da estrutura anatômica (principalmente em relação a espessura da parede), da composição química e das propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus* são primordiais para a produção de energia (ROCHA, 2011). A seleção de espécies para a produção de florestas energéticas visa homogeneizar as propriedades da madeira e propiciar melhorias no rendimento e densidade do carvão

vegetal, teor de carbono fixo e outras propriedades almeçadas na sua utilização como termorreduzidor (CAMPOS, 2008).

Para fins energéticos, são desejáveis para o melhoramento genético as espécies de eucalipto que têm elevado potencial produtivo, alta densidade e alto teor de lignina, pois o rendimento na produção de carvão vegetal é maximizado com o uso de madeiras mais densas, de maior poder calorífico e com teor de carbono igual ou superior a 75% (PALUDZYSYN FILHO, 2008). A madeira do eucalipto possui grande potencial como fonte energética, entretanto, a busca por outras biomassas é importante para reduzir a dependência dessa matéria-prima e descentralizar a produção.

### 3.5 RESÍDUOS DO DESDOBRO DE TORAS

A cobertura florestal brasileira é constituída por florestas naturais e plantadas e ocupa uma área total de 493,64 milhões de ha, em que as florestas naturais são predominantes (485,8 milhões de ha), representadas principalmente pela Floresta Amazônica (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACÕES FLORESTAIS, 2014) e 7,84 milhões de hectares de florestas plantadas (IBÁ, 2017).

Em 2012, os países que tiveram maior produção de madeira tropical foram Indonésia, Índia, Brasil e Malásia, sendo responsáveis por dois terços da produção total comercializada (ITTO, 2014).

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017) o setor florestal gerou cerca de 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2016, dos quais 33,7 milhões de toneladas (70,5%) foram gerados pelas atividades florestais e 14,1 milhões de toneladas (29,5%) pelas atividades industriais. O setor industrial madeireiro é caracterizado pelo alto volume de desperdício da matéria-prima na cadeia produtiva, mostrando elevado potencial para aproveitamento de resíduos industriais (BONDUELLE et al., 2002). No desdobro, a porcentagem de resíduos varia comumente entre 40% a 60% do volume da tora (LIMA; SILVA, 2005).

Embora os resíduos madeireiros de maior tamanho sejam aproveitados para diversos fins específicos, os de menores dimensões, tal como a serragem, podem representar um problema de gestão ambiental para as empresas (HILLIG et al., 2009). Porém, pela falta de um destino adequado, boa parte desses resíduos são

simplesmente empilhados e encontram-se em diversos estágios de decomposição, causando problemas de poluição do solo e do lençol freático. Muitas vezes, são queimados a céu aberto ou entram em combustão espontânea, causando também a poluição da atmosfera (DIAS et al., 2012; PIERRE, 2010; YUBA, 2001).

Uma das alternativas para agregar valor e reduzir os impactos causados pelos resíduos madeireiros, principalmente a serragem, é a sua utilização na produção de energia, na forma de briquetes ou *pellets* (LIMA; SILVA, 2005). O uso energético desses resíduos tem grandes vantagens, como mudança na matriz energética, ampliação na geração de renda, diminuição dos gases de efeito estufa, diminuição dos volumes de resíduos depositados no ambiente e, conseqüentemente, redução de custos (QUIRINO, 2003).

### 3.6 PELETIZAÇÃO DA BIOMASSA

A biomassa é considerada fonte de energia renovável quando a oferta da matéria-prima é realizada por meio de manejo florestal adequado ou de resíduos florestais, industriais ou urbanos. A biomassa pode ser oriunda de resíduos sólidos urbanos, florestais, agrícolas, industriais, também podendo ser de origem animal ou vegetal.

Atualmente, muitos países da Europa utilizam a biomassa como matéria-prima para a produção de combustível e possuem tecnologias consolidadas para a sua combustão, gerando calor para aquecimento industrial e energia elétrica (ALMEIDA, 2015). A peletização é uma das formas de aproveitamento da biomassa, que é realizada compactando-se o material em uma matriz de peletização por meio de alta pressão. O produto final obtido são os *pellets*, com dimensões entre 6 a 12 mm de diâmetro e comprimentos variados (STAHL; BERGHEL, 2011).

Para obtenção de *pellets* uniformes e padronizados e, conseqüentemente, de fácil manipulação, transporte, armazenamento e utilização, algumas variáveis devem, ser consideradas. Com relação ao material e processo de produção, as principais variáveis são umidade, tamanho das partículas e densidade; e para o processo, pressão e temperatura de compactação (HOFFELDER, 2011). Conforme Nielsen et al. (2009) e Garcia (2010), o processo de peletização é realizado conforme as seguintes etapas:

- Obtenção da matéria-prima: biomassa vegetal disponível, com potencial para energia.
- Uniformização das partículas: preferencialmente com diâmetro máximo inferior a 5,0 mm, para obtenção de um produto de qualidade.
- Secagem da matéria-prima: remoção da umidade do material, a teores entre 8 a 12 %.
- Peletização: compactação por extrusão por meio de uma peletizadora, utilizando pressão em torno de 300 MPa e temperatura aproximada de 120 °C.
- Resfriamento do produto: promove a estabilização da lignina após a peletização em altas temperatura, realizada antes do produto ser direcionado para o empacotamento.
- Empacotamento e armazenamento: utilizam-se sacos plásticos de 5 até 50 kg; fardos industriais de 500 a 1000 kg; ou até em caminhões tanques (a granel).

### 3.7 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE *PELLETS* DE RESÍDUOS FLORESTAIS

O Brasil ainda não possui normas e padrões para biocombustíveis sólidos, como os *pellets*, estando ainda em fase de desenvolvimento. As normas europeias e norte-americanas já estão consolidadas e são utilizadas internacionalmente na avaliação da qualidade de *pellets* (CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012; GARCIA, 2010). A composição química e as propriedades físicas e térmicas são critérios importantes para avaliar a qualidade dos *pellets*.

Com relação à composição química, as principais variáveis a serem observadas são os teores de materiais voláteis, enxofre, magnésio, cálcio, fósforo e cinzas (HANH, 2004). Destaca-se o teor de cinzas, que corresponde à fração máxima dos resíduos restantes após a combustão, formados por minerais presentes na biomassa, tais como cobre, cálcio, ferro, magnésio, potássio e sódio. Elevados teores de cinzas são indesejáveis para a carbonização de biomassas (BRAND, 2014).

Em relação as propriedades físicas, destacam-se o teor de umidade, a densidade e as dimensões do produto (HAHN, 2004). A umidade é um dos fatores mais estudados em processo de peletização, visto que em casos de umidade elevada ocorrerão alguns impactos negativos, tais como: diminuição da durabilidade e da resistência (influenciando no tempo de estocagem), aumento da geração de finos e

redução do poder calorífico, o que vai tornar o processo de combustão mais difícil (CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012).

A durabilidade é outra propriedade física importante na análise de *pellets* de biomassa. *Pellets* mais duráveis não se desagregam facilmente, minimizando a fração de finos, que é indesejável, visto que é prejudicial à saúde humana em casos de inalação, além de também afetar a qualidade dos *pellets* após o transporte (TEMMERMAN et al., 2006).

O poder calorífico é o parâmetro que define a quantidade de energia térmica liberada por um combustível por unidade de massa (MJ/kg). Representa uma propriedade competitiva do processo de peletização de biomassa, uma vez que se obtém um aumento significativo no poder calorífico e na densidade energética em comparação à biomassa original (GARCIA, 2010).

A seguir encontram-se as principais vantagens da utilização de *pellets* de biomassa (WOLF; VIDLUND; ANDERSON, 2006; CARONE; PANTALEO; PELLERANO, 2011):

- A peletização aumenta a densidade e o poder calorífico, e diminui o teor de umidade, resultando em um material com maior densidade energética que a biomassa original.
- Redução dos custos de transporte, sendo um dos fatores mais importantes na viabilização da peletização, pois com a densificação da biomassa transporta-se mais energia por unidade de massa. Além disso, a geometria dos *pellets* favorece o seu condicionamento em embalagens, o que facilita o transporte.
- Menor área e custo de estocagem, pois o aumento da densidade possibilita que o produto seja armazenado em áreas menores quando comparado com a biomassa original.
- Produto de fácil manuseio, por ser uniforme e ter pequenas dimensões.
- Agregação de valor aos resíduos, pois a peletização transforma em combustível os resíduos de biomassa que, na maioria dos casos, seriam descartados no meio ambiente.
- Controle da chama e homogeneidade da combustão, principalmente por causa da homogeneidade do material e elevada densidade energética, minimizando as variações do processo nas caldeiras e fornalhas.

- Conservação das características e propriedades do produto por longos períodos após armazenamento. A susceptibilidade às variações ambientais é minimizada, pela sua alta compactação, mantendo-se principalmente a forma, a densidade e a umidade dos *pellets*.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 COLETA DOS RESÍDUOS DE MADEIRA NA SERRARIA

A biomassa utilizada na produção dos *pellets* foi a serragem, resíduo produzido no desdobro de toras em serrarias, de duas espécies madeireiras nativas da Região Amazônica, que foram doado pela empresa Equatorian S.A., localizada no município de Macapá, Amapá: *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) e *Manilkara elata* (maçaranduba). Adicionalmente, utilizou-se resíduo de *Eucalyptus* sp., que é a matéria-prima mais pesquisada no Brasil na produção de *pellets*, doado pela empresa Eng-Maq®, situada no município de Boa Esperança do Sul, São Paulo.

Os resíduos de angelim-vermelho e maçaranduba foram coletados separadamente. Posteriormente, foram triados em peneiras de malha de 1 e 2 mm para a remoção dos finos e, em seguida, foram secos ao ar livre e acondicionados em embalagens plásticas com identificação da espécie e local de coleta.

### 4.2 ANÁLISE DO RESÍDUO DAS MADEIRAS TESTADAS

A análise dos resíduos foi realizada de acordo com as composições utilizadas para a produção dos *pellets*, conforme consta no Quadro 1, em que foram avaliadas as seguintes propriedades: teor de umidade, densidade a granel, composição química (teores de lignina total, extrativos totais e cinzas), poder calorífico superior, poder calorífico inferior e densidade energética. Essas análises foram realizadas nos laboratórios de Química da Madeira e de Energia da Biomassa do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo.

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico (base massa anidra), segundo a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986). A densidade a granel foi determinada pela relação entre a massa do material e o volume do recipiente utilizado, conforme metodologia descrita pela NBR 6922 (ABNT, 1981). Para ambas as análises foram feitas duplicatas por composição.

Quadro 1. Composição dos resíduos para a produção dos *pellets*

Composição	Abreviação
Angelim-vermelho (100%)	AV
Maçaranduba (100%)	M
Eucalipto (100%)	E
Angelim-vermelho (25%) + eucalipto (75%)	AV25 + E75
Angelim-vermelho (50%) + eucalipto (50%)	AV50 + E50
Angelim-vermelho (75%) + eucalipto (25%)	AV75 + E25
Maçaranduba (25%) + eucalipto (75%)	M25 + E75
Maçaranduba (50%) + eucalipto (50%)	M50 + E50
Maçaranduba (75%) + eucalipto (25%)	M75 + E25
Angelim-vermelho (50%) + maçaranduba (50%)	AV50 + M50
Angelim-vermelho (33,3%) + maçaranduba (33,3%) + eucalipto (33,3%)	AV33.3 + M33.3 + E33.3

Fonte: A autora.

Para a composição química foram efetuadas análises dos teores de lignina total, extrativos totais e cinzas. O material foi moído em moinho do tipo *Willey* e classificado em peneiras sobrepostas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 *mesh* (abertura de 0,42 mm) e ficou retida na de 60 *mesh* (0,25 mm). Após este procedimento, os resíduos foram acondicionados em sala climatizada para homogeneização da umidade. As análises químicas foram realizadas em duplicata para cada composição.

A análise dos extrativos totais foi realizada conforme a norma 204 om-88 da *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI, 1996), utilizando-se etanol-tolueno (1:2). Após a remoção dos extrativos, foram pesados 0,3 g do material seco para a quantificação da lignina. Na determinação do teor de lignina insolúvel foi utilizado o método descrito por Gomide e Demuner (1986), ao passo que para a lignina solúvel em ácido sulfúrico foi empregado o método de espectrofotometria, conforme descrito por Goldshimid (1971). Para o cálculo do teor de lignina total foi realizada a soma dos teores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986).

Para a análise do poder calorífico superior foi utilizada a NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se um calorímetro, no qual foi analisado 1 g de material com

granulometria de 60 *mesh*. O poder calorífico inferior foi calculado conforme a Equação 1 e a análise foi realizada em duplicata para cada composição.

$$PCI = PCS - \frac{600 \times 9H}{100} \quad (1)$$

Em que – PCI: poder calorífico inferior (kcal/kg); PCS: poder calorífico superior (kcal/kg); H: teor de hidrogênio (% , base anidra).

A densidade energética foi obtida de acordo com as Equações 2 e 3.

$$PCL = \left[ \frac{PCI - (6xU)}{100 + U} \right] x 100 \quad (2)$$

$$DE = Da + PCL \quad (3)$$

Em que – PCL: poder calorífico líquido (kcal/kg); PCI: poder calorífico inferior (kcal/kg); U: umidade (%); DE: densidade energética (GJ/m<sup>3</sup>); Da: densidade a granel (kg/m<sup>3</sup>).

#### 4.3 PRODUÇÃO E ANÁLISE DOS *PELLETS*

Para a produção dos *pellets*, foram utilizadas 11 composições diferentes (Quadro 1), que foram elaboradas com base na situação prática industrial das serrarias da Região Amazônica, em que o resíduo de diferentes espécies encontra-se misturado. O resíduo de eucalipto foi incorporado em algumas composições por causa da disponibilidade dessa biomassa e também por ser o material mais pesquisado no Brasil na produção de *pellets*.

Previamente à peletização, cada composição foi preparada com 8 kg de resíduo, com teor de umidade médio (três espécies) igual a 8,3%. Por exemplo, para a composição AV50+M50, foram utilizados 8 kg de resíduo úmido, sendo 4 kg de resíduo de angelim-vermelho (50%) e 4 kg de resíduo de maçaranduba (50%). Cada composição foi peletizada separadamente em uma peletizadora laboratorial (Figura 1) da marca Eng-Maq, modelo 0400 V, 40 CV, capacidade para produção de 400 kg/h, utilizando-se uma matriz plana de 6 mm de diâmetro (Figura 2).

Figura 1 – Peletizadora de matriz plana



Fonte: A autora.

Figura 2 – Matriz plana de 6 mm de diâmetro



Fonte: A autora.

A qualidade dos *pellets* foi analisada com base na composição química e nas propriedades físicas, mecânicas e energéticas. O teor de umidade, a densidade a granel, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior e a densidade energética dos *pellets* foram determinados ao utilizarem os mesmos procedimentos descritos anteriormente na análise dos resíduos. Essas análises foram realizadas em duplicata para cada composição.

O método estereométrico foi utilizado para determinar a densidade aparente unitária dos *pellets*, em que o volume foi calculado considerando a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa foi obtida em balança analítica digital (0,0001 g). Para esse procedimento foram amostrados, aleatoriamente, 25 *pellets* de cada composição. Os mesmos dados desse ensaio foram utilizados nas análises de diâmetro e comprimento dos *pellets*.

Para a análise da temperatura máxima de combustão foi utilizado um queimador de *pellets* da marca Eng-Maq, modelo 0400 V, pertencente ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo (Figuras 3 e 4).

Figura 3 – Vista lateral do queimador: 1 – câmara de alimentação. Vista frontal do queimador: 2 – Painel de controle em primeiro plano



Fonte: A autora.

Figura 4 – Queimador em funcionamento durante a realização do ensaio de temperatura máxima de combustão



Fonte: A autora.

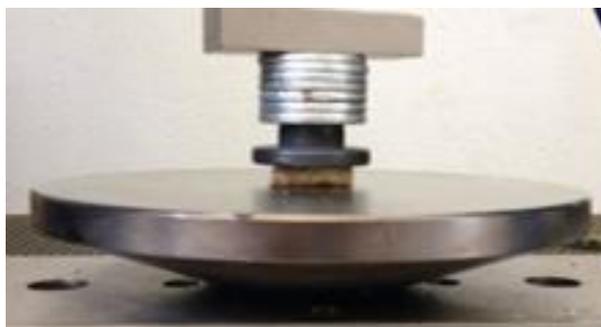
Inicialmente, a câmara de combustão do queimador foi alimentada com uma fração de biomassa, que teve a sua ignição realizada mediante a aplicação de chama direta de uma fonte artificial por cerca de 5 minutos. Em seguida, foi regulada a ventilação da câmara de combustão com velocidade de 35 km/h. Por fim, o queimador foi abastecido com 5 kg de *pellets*, que foram transportados automaticamente para a câmara de combustão mediante um sistema de rosca sem-fim. A temperatura de combustão foi verificada pela leitura direta do painel de controle da máquina, até a combustão total dos *pellets*, registrando-se a temperatura máxima. Este procedimento foi realizado separadamente para cada composição.

A análise química imediata dos *pellets* foi realizada visando determinar os teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo, conforme a norma D1762-84 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2007). Essas análises foram realizadas em triplicatas.

A resistência à compressão diametral dos *pellets* foi realizada com base no método proposto por Faria et al. (2016), em que ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios, com velocidade de carregamento de 3 mm/min, ao utilizar uma

célula de carga com capacidade para 2 toneladas (Figura 5). Foram utilizados 25 *pellets* por composição, selecionados aleatoriamente, e a compressão diametral foi calculada conforme a Equação 4 (FARIA et al., 2016).

Figura 5 – Ensaio de compressão diametral



Fonte: A autora.

$$CD = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (4)$$

Em que – CD: compressão diametral (MPa); F: força máxima de ruptura (N); d: diâmetro do *pellet* (mm); l: comprimento do *pellet* (mm).

A porcentagem de finos e a durabilidade mecânica foram determinadas utilizando-se o equipamento Ligno-Tester, da marca Holmen® (Figura 6), no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma EN 15210-1 (DIN, 2010), em que foram analisadas cinco amostras de 300 g de *pellets* por composição. A porcentagem de finos e a durabilidade mecânica foram calculadas, respectivamente, de acordo com as Equações 5 e 6 (DIN, 2010).

$$PF = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \times 100 \quad (5)$$

$$DM = \frac{M_i}{M_f} \times 100 \quad (6)$$

Em que – PF: porcentagem de finos (%);  $M_i$ : massa inicial antes do ensaio (g);  $M_f$ : massa final após o ensaio (g); DM: durabilidade mecânica (%).

Figura 6 – Equipamento Ligno-Tester



Fonte: A autora.

Algumas propriedades (teor de umidade, diâmetro, comprimento, teor de cinzas, porcentagem de finos e durabilidade) das diferentes composições dos *pellets* foram classificadas de acordo com os critérios estabelecidos na norma EN 14961-6 (DIN, 2012a).

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os resultados das análises dos resíduos e alguns resultados das análises dos *pellets* (teor de umidade, densidade a granel, poder calorífico inferior, densidade energética, temperatura máxima de combustão, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) foram apresentados em termos de médias. A comparação das médias e a discussão dos resultados foi realizada em termos de mínimas e máximas. Nesses casos não foi realizado nenhum teste de comparação de médias por causa do pequeno número de repetições (duas ou três).

Para as demais propriedades dos *pellets* (diâmetro, comprimento, compressão diametral, porcentagem de finos e durabilidade mecânica), a análise estatística foi realizada em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 11 tratamentos,

representados pelas diferentes composições (Quadro 1). Para todas as análises, o nível de significância adotado foi de 5% de probabilidade e o efeito dos tratamentos nas propriedades avaliadas foi verificado com a utilização da Análise de Variância (ANOVA). Confirmada a rejeição da hipótese nula (valor  $P < 0,05$ ), utilizou-se o teste de Scott-Knott para a diferenciação das médias. Todas as análises estatísticas foram realizadas com a utilização do *software* Sisvar versão 5.6, Build 86.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS

Na Tabela 1 encontram-se as médias dos teores de umidade, lignina total, extrativos totais e cinzas dos resíduos utilizados na produção dos *pellets*, para as 11 composições analisadas.

Tabela 1 –Médias dos teores de lignina total, extrativos totais e cinzas dos resíduos por composição

<b>Composição</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>	<b>Lignina total (%)</b>	<b>Extrativos totais (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>
100AV	7,88	34,60	20,21	0,48
100M	8,06	32,39	14,33	0,72
100E	8,52	27,33	10,65	0,21
25AV+75E	8,51	30,86	14,67	0,28
50AV+50E	8,28	32,17	17,46	0,88
75AV+25E	8,31	32,73	19,62	0,42
25M+75E	8,30	28,89	11,85	0,29
50M+50E	8,55	30,30	13,56	0,35
75M+25E	8,68	31,00	13,79	0,50
50AV+50M	8,30	32,81	17,39	0,57
33,3AV+33,3M+33,3E	8,29	32,00	15,86	0,44

AV: angelim-vermelho; M: maçaranduba; E: eucalipto.

As médias mínima e máxima do teor de umidade foram das composições 100AV e 75M + 25E, respectivamente. A umidade média dos resíduos antes da peletização foi igual a 8,33%, ou seja, dentro da amplitude recomendada na literatura, que pode variar entre 4,95% e 12,36% (ALMEIDA, 2015; CAMARGO, 2013; CUBERO-ABARCA et al., 2014; FARIA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2014).

Os valores mínimos para o teor de extrativos totais e lignina total foram da composição 100E, com respectivamente 10,65% e 27,33%. Os valores máximos foram da composição 100AV, com 20,21% e 34,60%. Dessa forma, as amplitudes

para o teor de extrativos e lignina total foram iguais a 9,56 pontos percentuais (p.p.) e 7,27 p.p., respectivamente.

Maiores teores de lignina e extrativos totais são desejáveis para a produção de energia de biomassa. De acordo com Protásio et al. (2013b), os extrativos facilitam a decomposição dos componentes estruturais da madeira, diminuindo a energia de ativação necessária. Nielsen et al. (2009) afirmam que os extrativos atuam como lubrificantes durante o processo de peletização, diminuindo as exigências de energia durante a densificação da biomassa lignocelulósica.

Maiores teores de lignina estão associados a altos valores de poder calorífico, por causa da grande concentração de carbono e da natureza aromática da sua composição (PROTÁSIO et al., 2013a; SILVA et al., 2014). A alta temperatura empregada durante o processo de peletização faz com que a lignina se torne plástica e atue como aglutinante natural das partículas da biomassa durante a sua densificação. Desse modo, maiores teores de lignina contribuem positivamente no processo e, conseqüentemente, resultam em *pellets* com melhores características físicas, mecânicas e energéticas.

De modo geral, as espécies nativas tropicais são menos pesquisadas que as exóticas, o que dificulta a obtenção de dados das diversas propriedades da madeira. A média do teor de lignina total da madeira de angelim-vermelho (34,60%) foi inferior a reportada (37,41%) por Paula (2016). A média do teor de lignina total da madeira de maçaranduba (32,39%) também foi inferior a reportada (34,68%) por Nobre et al. (2015). As madeiras nativas da Região Amazônica enquadram-se no padrão de possuírem elevados teores de lignina, variando entre 28% e 36% (SANTANA; OKINO, 2007), em que os resultados do angelim-vermelho e da maçaranduba encontram-se neste intervalo.

O resultado do teor de lignina total da serragem de eucalipto foi similar ao reportado para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* (GUIMARÃES et al., 2013). Conforme Protásio et al., 2013b), o teor de lignina total pode chegar a níveis superiores a 35% para as espécies de *Eucalyptus* sp.

A média de extrativos totais da madeira de angelim-vermelho (20,21%) foi maior do que a reportada (16,95%) na literatura por Paula (2016). A média de extrativos totais da madeira de maçaranduba (14,13%) também foi maior do que a

obtida (7,36%) por Nobre et al. (2015). Protásio et al. (2013b) encontraram uma média de 4,16% de extrativos em clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, valor inferior ao encontrado nesse trabalho quando comparado a 100E.

Conforme exposto, os teores de extrativos totais e lignina total interferem significativamente na qualidade da biomassa utilizada para fins energéticos. Como a amplitude dos resultados das composições foi grande, espera-se que as propriedades dos *pellets* também variem entre as composições, com melhores resultados para aquelas com maior proporção de resíduo de angelim-vermelho.

As médias dos teores de cinzas das espécies angelim-vermelho, maçaranduba e eucalipto foram iguais a 0,48%, 0,72% e 0,21%, respectivamente. Para o angelim-vermelho e a maçaranduba, as médias encontram-se dentro do reportado por Trugilho et al. (1991) para a madeira de 12 espécies da Região Amazônica, que atingiram teores de cinzas entre 0,15% e 0,87%. Paula (2016) obteve média similar para a madeira de angelim-vermelho (0,43%), ao passo que Nobre et al. (2015) relataram média inferior para a madeira de maçaranduba (0,33%).

Uma característica comum entre espécies de eucalipto são os baixos teores de cinzas da madeira, em geral variando de 0,07% a 1% (CHAVES et al., 2013; NEVES et al., 2011; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011, 2013b). Ou seja, a média deste trabalho encontra-se dentro dessa amplitude reportada na literatura.

Teores de cinzas acima de 3% para madeira são indesejáveis para a utilização em fins energéticos (PROTÁSIO et al., 2013a). Biomassas com elevados teores de cinzas emitirão mais partículas durante a carbonização e, igualmente, formarão mais depósitos nos equipamentos, prejudicando a transmissão de calor e demandando mais manutenção (BRAND et al., 2013; RABAÇAL, 2010). Como o valor máximo das composições analisadas foi igual a 0,88% (50AV+50E), não é de se esperar esses problemas para o material analisado.

## 5.2 AVALIAÇÃO DOS PELLETS

### 5.2.1 Teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas

Na Tabela 2 encontram-se os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos *pellets* para as 11 composições.

Tabela 2 – Médias dos teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos *pellets*

<b><i>Pellets</i></b>	<b>Teor de umidade (%)</b>	<b>Materiais voláteis (%)</b>	<b>Carbono fixo (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>
100AV	7,22	76,78	22,88	0,35
100M	9,30	78,40	20,94	0,65
100E	8,03	81,09	18,70	0,21
25AV+75E	8,45	79,89	19,87	0,23
50AV+50E	8,23	78,79	20,95	0,25
75AV+25E	8,22	77,49	22,19	0,32
25M+75E	8,40	80,79	19,03	0,18
50M+50E	7,84	80,05	19,50	0,45
75M+25E	8,52	79,41	19,99	0,60
50AV+50M	9,04	77,54	21,91	0,55
33,3AV+33,3M+33,3E	9,09	78,82	20,54	0,64

AV: angelim-vermelho; M: maçaranduba; E: eucalipto

As médias mínima e máxima da umidade dos *pellets* foram iguais a 7,22% (100AV) e 9,30% (100M), respectivamente, e encontram-se no intervalo de 4,95% a 12,36% reportado na literatura (ALMEIDA, 2015; CAMARGO, 2013; CUBERO-ABARCA et al., 2014; FARIA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2014). A umidade média dos *pellets* foi de 8,39%, ou seja, praticamente a mesma da umidade dos resíduos (8,33%), mesmo havendo uma correção da umidade dos resíduos para 18% previamente à peletização. Faria et al. (2016) afirmaram que esse efeito é comum, porque o aumento da temperatura dentro da peletizadora, causado pela compactação a elevada pressão, provoca evaporação de parte da água da biomassa.

Os *pellets* das 11 composições foram enquadrados como “tipo A”, de acordo com o critério de umidade estabelecido pela norma EN 14961-6 (DIN, 2012a). Faria et al. (2016) reportaram que *pellets* com umidade inferior a 10%, tais como os deste trabalho, podem ser armazenados por mais tempo e possuem melhores propriedades energéticas.

O teor de materiais voláteis está relacionado ao comportamento do combustível na decomposição térmica em forma de gases, tais como o monóxido e o dióxido de carbono (PARK et al., 2013). O processo de combustão é prejudicado em biomassas com elevados teores de materiais voláteis, porque a rápida difusão dessas substâncias acelera a ignição do combustível a temperaturas inferiores (VIEIRA, 2012).

O teor de materiais voláteis para a madeira utilizada para fins energéticos encontra-se entre 75% e 85% (BRITO; BARRICHELLO, 1982). Os valores mínimo e máximo do teor de materiais voláteis foram de 76,78% (100AV) e 81,09% (100E), respectivamente, e encontram-se na amplitude mencionada anteriormente.

O teor de carbono fixo é obtido ao se tomar 100% e deduzir da soma dos teores de materiais voláteis e cinzas. É uma medida importante, pois elevados teores de carbono fixo irão fazer com que o material queime de forma mais lenta, permitindo que os combustíveis permaneçam mais tempo na fornalha para combustão completa.

Com base nos resultados dos resíduos, era de se esperar que o teor de cinzas dos *pellets* também fosse baixo. O valor máximo do teor de cinzas foi da composição 100M (0,65%) e encontra-se abaixo dos 5% exigidos pela EN 14961-6 (DIN, 2012a) e, dessa forma, os *pellets* de todas as composições foram classificados como “tipo A”.

### **5.2.2 Comparação entre resíduos e *pellets*: poder calorífico inferior, densidade a granel e densidade energética**

Na tabela 3 encontram-se os resultados da densidade a granel, taxa de compactação e densidade energética.

Tabela 3 – Médias de poder calorífico inferior, densidade a granel, taxa de compactação e densidade energética

Composições	Resíduos			Pellets		
	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade energética (GJ/m <sup>3</sup> )	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade energética (GJ/m <sup>3</sup> )
100AV	19,15	268,43	5,88	18,97	639,35 (2,38)‡	12,12
100M	18,93	258,34	5,78	18,76	637,28 (2,47)	11,96
100E	18,01	240,63	4,34	18,17	609,89 (2,53)	11,08
25AV+75E	18,16	240,41	4,38	18,32	627,72 (2,61)	11,50
50AV+50E	18,73	249,73	5,31	18,49	631,57 (2,53)	11,68
75AV+25E	18,91	258,91	5,52	18,54	635,42 (2,45)	11,78
25M+75E	17,93	229,26	4,32	18,25	625,60 (2,73)	11,42
50M+50E	18,35	238,87	5,20	18,29	629,60 (2,64)	11,51
75M+25E	18,49	248,61	5,39	18,67	633,36 (2,55)	11,82
50AV+50M	18,93	264,39	5,83	19,04	639,53 (2,42)	12,18
33,3AV+33,3M+33,3E	18,22	253,78	5,55	18,73	638,89 (2,52)	11,97

‡Resultados entre parênteses referem-se à taxa de compactação (densidade a granel dos *pellets*/densidade a granel do resíduo).

O poder calorífico é uma das principais propriedades analisadas na avaliação de uma biomassa para fins energéticos. Os valores mínimo e máximo do poder calorífico inferior para os resíduos foram de 17,93 MJ/kg (25M+75E) e 19,15 MJ/kg (100AV), respectivamente e; da mesma forma, para os *pellets*, foram iguais a 18,17 MJ/kg (100E) e 19,04 MJ/kg (50AV+50AM).

Com base nesses resultados, verifica-se que a amplitude de poder calorífico inferior foi semelhante, tanto para as composições dos resíduos, quanto para os *pellets*. De acordo com Brito (1993), espera-se que o poder calorífico inferior da madeira de folhosas encontre-se entre 13 MJ/kg e 19,5 MJ/kg, o que foi verificado para as 11 composições de resíduos e *pellets*. Com base nesses resultados, as composições foram classificadas como apropriadas para a utilização energética.

A densidade a granel do material é importante para quantificar volumes de produtos com formas variáveis, pois fornece informações que serão úteis para a logística e transporte, por considerar os espaços vazios entre as partículas. Além disso, a densidade a granel também é utilizada para o cálculo da densidade energética (GARCIA, 2010).

Os valores mínimo e máximo de densidade a granel dos *pellets* foram de 609,89 kg/m<sup>3</sup> (100E) e 639,53 kg/m<sup>3</sup> (50AV+50M), respectivamente. As médias de densidade a granel estão de acordo com a literatura, que relata valores variando de 435 kg/m<sup>3</sup> a 730 kg/m<sup>3</sup> para *pellets* de diferentes materiais lignocelulósicos (FARIA et al., 2016; GARCIA, 2010; PEREIRA, 2014; PROTÁSIO et al., 2015; SPANHOL et al., 2015). Deste modo, todas as composições se enquadraram nas exigências da norma EN 14961-6 (DIN, 2012a), que estabelece o valor mínimo de 600 kg/m<sup>3</sup> para a densidade a granel dos *pellets*.

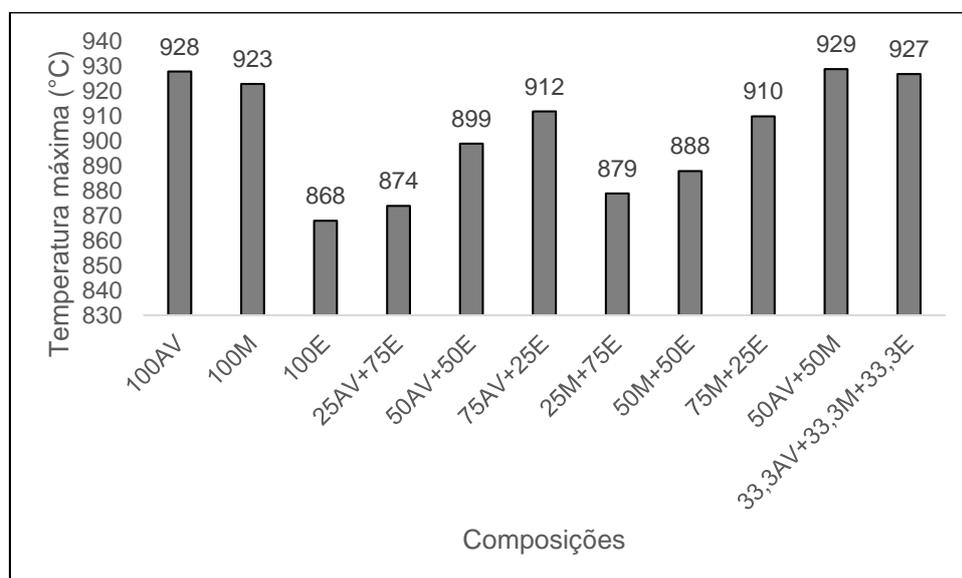
A taxa de compactação corresponde a razão entre a densidade a granel dos *pellets* e a do resíduo utilizado na sua produção. Ou seja, essa medida representa quantas vezes mais massa de *pellets* podem ser contidas em uma mesma unidade de volume em relação ao resíduo. Os valores mínimo e máximo de taxa de compactação foram iguais a 2,38 (100AV) e 2,73 (25M+75E), respectivamente. Esses resultados reforçam as vantagens da peletização ao se produzir uma biomassa densificada, com grande quantidade energética e em um volume reduzido (CARONE; PANTALEO; PELLERANO, 2011; WOLF; VIDLUND; ANDERSON, 2006).

A densidade energética representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de um determinado volume de combustível (PROTÁSIO, 2011; PROTÁSIO et al., 2015). Os valores mínimo e máximo de densidade energética dos resíduos foram de 4,32 GJ/m<sup>3</sup> (25M+75E) e 5,88 GJ/m<sup>3</sup> (100AV), respectivamente. Da mesma forma, variaram entre 11,02 GJ/m<sup>3</sup> (25M+75E) a 12,91 GJ/m<sup>3</sup> (50AV+50M) para os *pellets*.

Conforme reportado na literatura (CARONE; PANTALEO; PELLERANO, 2011; WOLF; VIDLUND; ANDERSON, 2006), uma das principais vantagens da peletização é o aumento da densidade energética, ou seja, consegue-se armazenar ou transportar mais energia para um mesmo volume de combustível. Em média, a densidade energética dos *pellets* avaliados foi 2,34 vezes maior que a dos resíduos, em que os maiores aumentos foram conseguidos pelas composições 100E, 25AV+75E e 25M+75E, todas com 2,55 vezes, e a menor média (2,19 vezes) foi da composição 100AV.

### 5.2.3 Temperatura máxima de combustão

A temperatura máxima de combustão variou entre 929 °C (50AV+50M) a 868 °C (100E). De acordo com a Figura 7, o aumento da proporção de resíduo de eucalipto na composição dos *pellets* reduziu a temperatura máxima de combustão. Para as composições puras (100%), a maior temperatura foi do angelim-vermelho, com 928 °C, ou seja, 60 °C superior (ou 6,9%) ao eucalipto.

Figura 7 – Temperatura máxima de combustão dos *pellets*

As temperaturas máximas de combustão das 11 composições enquadraram-se no intervalo citado por Barros (2013), que mencionou temperaturas entre 800 °C a 1000 °C para a combustão completa de *pellets* da espécie portuguesa *Quercus suber* L. O desempenho observado em relação à temperatura máxima de combustão gera informações acerca da dinâmica de combustão do material, permitindo um melhor dimensionamento do sistema de queima dos equipamentos utilizados para geração de aquecimento (RABAÇAL, 2010).

### 5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Na Tabela 4 encontram-se as médias das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* avaliados. As dimensões dos *pellets* são variáveis controladas no processo de produção, principalmente pelas características da peletizadora. De acordo com Liu et al. (2013), *pellets* com menores diâmetros (4 a 6 mm) proporcionam uma combustão mais homogênea em comparação a *pellets* de diâmetros maiores (10 a 12 mm), principalmente em fornos de pequenas dimensões.

Tabela 4 – Média das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* avaliados

Composições	Propriedades físicas			Propriedades mecânicas		
	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Densidade aparente unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Compressão diametral (MPa)	Finos (%)	Durabilidade mecânica (%)
100AV	23,68 a	6,02 b	1.055	12,89 a	0,09 a	97,72 a
100M	24,49 a	6,01 b	1.042	12,82 a	0,07 b	97,17 b
100E	20,02 b	6,10 a	1.021	11,26 c	0,10 a	96,28 b
25AV+75E	18,43 c	6,02 b	1.028	10,56 d	0,09 a	97,30 b
50AV+50E	19,21 b	6,07 a	1.039	11,21 c	0,05 c	97,22 b
75AV+25E	18,13 c	6,09 a	1.043	12,07 b	0,05 c	97,56 b
25M+75E	18,15 c	6,07 a	1.018	10,47 d	0,10 a	96,24 b
50M+50E	18,37 c	6,01 b	1.029	10,85 c	0,05 c	97,36 b
75M+25E	19,40 b	6,06 a	1.038	11,89 b	0,05 c	97,23 b
50AV+50M	20,03 b	6,08 a	1.056	12,78 a	0,05 c	97,62 a
33,3AV+33,3M+33,3E	18,86 c	6,00 b	1.053	12,73 a	0,05 c	97,61 a
Valor de F calculado	15,89*	2,23*	0,33 <sup>ns</sup>	18,68*	17,42*	18,06*

\*Significativo em nível de 5% de probabilidade, de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ). ns: não significativo em nível de 5% de probabilidade, de acordo com o teste F ( $P > 0,05$ ). Médias seguidas de uma mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott ( $P > 0,05$ ).

Maiores comprimentos de *pellets* foram verificados para as composições puras (100%) de angelim-vermelho e maçanduba, que não diferiram significativamente entre si. Esse resultado pode ser explicado pelo fato da maior densidade da madeira dessas espécies, que resulta em maior resistência mecânica e minimiza a quebra dos *pellets*. Cinco composições tiveram menores comprimentos, não diferindo significativamente entre si: 25AV+75E, 75AV+25E, 25M+75E, 50M+50E e 33,3AV+33,3M+33,3E.

A variação dos diâmetros dos *pellets* foi menor que a dos comprimentos, em que as 11 composições se dividiram em dois grupos. A maior média absoluta foi da composição 100E, ao passo que a menor média absoluta foi da composição 33,3AV+33,3M+33,3E, representando uma amplitude de apenas 0,10 mm. Embora haja diferença significativa entre estas composições, não há nenhuma implicação prática neste caso, porque a diferença absoluta foi pequena. O diâmetro e o comprimento dos *pellets* de todas as composições atenderam às exigências estabelecidas pela norma EN 14961-6 (DIN, 2012a).

Não houve diferença significativa entre as densidades unitárias das diferentes composições, em que a maior média absoluta foi da composição 50AV+50M, com 1.056 kg/m<sup>3</sup>, ao passo que menor média absoluta foi da composição 25M+75E, com 1.018 kg/m<sup>3</sup>. As médias foram semelhantes às reportadas por Faria et al. (2016) para *pellets* produzidos com misturas de diferentes resíduos do processamento de grãos de café e madeira de eucalipto.

Elevadas densidades unitárias são desejáveis para os *pellets*, porque otimiza o transporte e o armazenamento do combustível. Essa propriedade pode tornar os *pellets* mais competitivos em relação a outros combustíveis tradicionais de madeira, tais como a lenha e o carvão vegetal (FARIA et al., 2016).

As maiores médias de resistência à compressão diametral foram das composições 100AV, 100M, 50AV+50M e 33,3AV+33,3M+33,3E, que não diferiram significativamente entre si. As menores médias foram das composições 25AV+75E e 25M+75E, que também não diferiram significativamente entre si. Desejam-se *pellets* com maior resistência mecânica, pois representa maior coesão entre as partículas, o que é importante para se minimizar a desagregação durante o transporte, o armazenamento e o manuseio.

Da mesma forma que a resistência à compressão diametral, Faria et al. (2016) afirmaram que a durabilidade mecânica e a porcentagem de finos estão associadas com a qualidade da coesão das partículas durante a peletização. *Pellets* com menor durabilidade mecânica resultam em maior teor de finos, representando um material que se desagrega mais facilmente, o que pode inviabilizar a comercialização. Garcia (2010) também alerta que *pellets* com elevada fração de finos representam maior risco de combustão durante o transporte, podendo causar graves acidentes.

As médias de durabilidade mecânica das composições puderam ser separadas em dois grupos, em que as maiores foram obtidas por 100AV, 50AV+50M e 33,3AV+33,3M+33,3E, que não diferiram significativamente. As médias das demais composições foram inferiores a estas três e não diferiram significativamente entre si.

A decisão estatística está alinhada com a norma EN14961-6 (DIN, 2012a), em que os *pellets* das composições 100AV, 50AV+50M e 33,3AV+33,3M+33,3E foram classificados como “tipo A”, porque tiveram durabilidade mecânica maior ou igual a 97,5%. Os *pellets* das demais composições foram classificados como “tipo B”, porque tiveram a durabilidade mecânica maior ou igual a 96%, porém menor que 97,5%.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4, houve diferença significativa entre a porcentagem de finos dos *pellets* das diferentes composições, em que foi possível distinguir três grupos. Contudo, a diferença entre a maior (0,10%) e a menor média absoluta (0,05%) foi igual a 0,05 p.p. Ou seja, é o mesmo caso verificado para o diâmetro dos *pellets*, em que apesar de haver diferença estatística, a mesma não tem implicações de ordem prática.

A discussão acima está em acordo com a classificação da norma EN 14961-6 (DIN, 2012a). Os *pellets* de todas as composições foram classificados como “tipo A”, porque tiveram porcentagem de finos menor que 2%.

## 6 CONCLUSÕES

- Os resíduos de angelim-vermelho e maçaranduba foram tecnicamente viáveis para a produção de *pellets*.
- Todas as 11 composições de resíduos de angelim-vermelho, maçaranduba e eucalipto foram tecnicamente viáveis para a produção de *pellets*.
- Praticamente não houve diferença no poder calorífico entre resíduos e *pellets*, para as 11 composições. O processo de peletização aumentou a densidade a granel e a densidade energética das composições, em média, em 2,53 e 2,34 vezes, respectivamente.
- Com base nos resultados de compressão diametral e durabilidade mecânica, as melhores composições de *pellets* foram 100AV, 50AV+50M e 33,3AV+33,3M+33,3E.
- Para as propriedades teor de umidade, comprimento, diâmetro, densidade a granel, teor de cinzas e porcentagem de finos, todas as composições de *pellets* foram classificadas como “tipo A” (melhor classificação).
- Para a durabilidade mecânica, apenas os *pellets* das composições 100AV, 50AV+50M e 33,3AV+33,3M+33,3E foram classificadas como “tipo A” (melhor classificação). Os demais foram classificados como “tipo B”.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. F. P. **Peletização do bagaço de cana-de-açúcar**: estudo das propriedades do produto e rendimento do processo. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)–Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: carvão vegetal: ensaios físicos: determinação da massa específica: densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

BARAÚNA, E.P. Tratamento térmico de madeira serrada do angelim pedra (*Dinizia excelsa* Ducke) com boro. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2. n.1., p. 30–36, 2011.

BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. **A expansão madeireira na Amazônia**: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará. 2. ed. Belém: IMAZON, 2002.166 p.

BONDUELLE, G.M.; CHIES, D.; MARTINS, D.G. O processo de fabricação de painéis compensados no estado do Paraná analisado por meio dos rendimentos e dos resíduos gerados. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2002. p.124.

BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (jacatirão-açu) na agricultura familiar em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRAND, M. A. et al. Influência das dimensões da biomassa estocada de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, p. 175-183, 2014.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G. Aspectos Técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** Local de Publicação: Editora, ano de publicação. p.101-137.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico.** *Revista IPEF*, Piracicaba, p. 1-6, 1993. (Circular Técnica, 181).

CAMARGO, B. S. **Avaliação de propriedades físicas, químicas e térmicas dos pellets de madeira.** 2013. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira)–Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2013.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR.** 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

CARASCHI, J. C.; PINHEIRO, D. G.; VENTORIM, G. Caracterização física e química de *pellets* de madeira produzidos no Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 13., 2012, Vitória. **Anais...** Vitória: EBRAMEM, 2012. 1 CD-ROM.

CARONE, M.T.; PANTALEO, A.; PELLERANO, A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of *pellets* from the pruning residues of *Olea europaea* L. **Biomass and Bioenergy**, Oxford,UK, v. 35, p. 402-410, 2011.

CARVALHO, N. P. R. **Implementação do plano de controle, inspeção e ensaio na produção de pellets de madeira.** 2011. 43 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais)-Instituto Politécnico de Viseu, Portugal, 2011.

CASTRO, T. C; CARVALHO, J. O. P. Dinâmica da população de *Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev. durante 26 anos após a exploração florestal em uma área de Terra Firme na Amazônia brasileira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, p. 161-169, 2014.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.17; p. 533. 2013.

CHIPAIA, F. C. Descrição anatômica macroscópica de madeira de oito espécie florestais comercializadas no município de Altamira-PA, Brasil. **Journal of Bioenergy end Food Science**, Macapá, v. 2, p. 18-24, 2015.

CUBERO-ABARCA, R.; et al. Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and *pellets* for heat generation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 461-470, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 14961-6**: solid biofuels: fuel specifications and classes: part 6, non-woody pellets for non-industrial use. Berlin, 2012a.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 15210-1**: solid biofuels: determination of mechanical durability of *pellets* and briquettes. Berlin, 2010.

DIAS, J. M. C. S. et al. Produção de briquetes e *pellets* a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, 2012. 132 p.

DOSSA, D. et al. **Produção e rentabilidade de eucaliptos em empresas florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. Comunicado Técnico 83.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Espécies arbóreas da Amazônia**: maçaranduba – *Manilkara huberi*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004a. 6 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de identificação botânica e anatômica**: angelim. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004b.

FARIA, W. S. et al. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em *pellets* para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137-147, 2016.

FEITOSA, B. C. **Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará**. Lettech Editora e Gráfica Ltda: Curitiba, 2008.  
Disponível em: <[http://www.remade.com.br/pt/revista\\_materia.php?edicao=114&id=1274l](http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=114&id=1274l)>. Acesso em: 22 jun. 2017.

FRANCESCHIN GL. Biomassa de madeira pode gerar 28 MW de energia. **FSP Saneamento & Meio Ambiente**, 2004. Disponível em: <<https://pib.socioambiental.org/c/noticias?id=32081>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 101 f. Dissertações (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de *pellets* de madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 135, p. 14-18, 2013. Disponível em:

<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1665&subject=pellets&title=caracteriza%e7%e3o%20energ%e9tica%20de%20pellets%20de%20madeira](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1665&subject=pellets&title=caracteriza%e7%e3o%20energ%e9tica%20de%20pellets%20de%20madeira)>. Acesso em: 22 jun. 2017.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARNEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: Willey, 1971. p. 241-298..

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GUIMARÃES, I. L. et al. Caracterização química e física da madeira de procedências de Eucalyptus. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 636-645, 2013.

HANH, B. **Pellets for Europe: existing guidelines and quality assurance for fuel pellets**. St. Polten, 2004. 20 p.

HILLIG, E.; SCHNEIDER, V.E.; PAVONI, E.T. Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. **Produção**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 292-303, 2009.

HOFFELDER, J. **Pellets de bagaço de cana-de-açúcar na matriz energética**. 2011. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUMMEL, A. C. et al. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados**. Belém: Imazon, 2010. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/\\_arquivos/miolo\\_resexec\\_polo\\_03\\_95\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/miolo_resexec_polo_03_95_1.pdf)>. Acesso em: 22 jun. 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ**. São Paulo: Design and DTP, 2017. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA. **Catálogo de madeiras da Amazônia: características tecnológicas, área da hidrelétrica de Balbina**, Manaus/AM. v.1. Manaus, 1991. 163 p.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Annual review and assessment of the world timber situation, 2008**. Yocohana, 2009. Disponível em: <<http://www.itto.org.jp>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

LENTINI, M. **Como funciona a indústria madeireira**. Belém: Imazom, 2008. Disponível em: <<http://empresasefinancas.hsw.uol.com.br/industria-da-madeira1.htm>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

LIMA, E. G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situados no polo moveleiro de Arapongas – PR. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 1, p. 105-116, 2005.

LORENZI, H., **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. ed. 2. v. 2. Nova Odessa: Plantarum, 2002. 315 p.

LIU, Z. et al. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, Oxford, v. 55, p. 1-5, 2013.

MONTEIRO, I. et al. Analysis of pelletizing of granulometric separation powder from cork industries. **Materials**, Basel, v. 7, p. 6686-6700, 2014.

NEVES, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, 2011.

NIELSEN, N. P. K. et al. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel**, Copenhagen, v. 89, n. 1, p. 94-98, 2009.

NOBRE, J. R. C. et al. Caracterização do carvão ativado produzido a partir de serragens de maçaranduba. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 693-707, 2015.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LAS MADERAS TROPICALES. **Reseña anual y evaluación de la situación mundial de las maderas**. Yokohama: Editora, 2013.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LAS MADERASTROPICALES. **Reseña bienal y evaluación de la situación mundial de las maderas 2013-2014**. Yokohama, Japón. 2014. 215 p.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 15, jun./ago. 2008. Disponível em: <[http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao\\_materias.php?id=15](http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15)>. Acesso em: 22 jun. 2017.

PARK, J.; MENG, J. J.; LIM, K. H.; ROJAS, O. J.; PARK, S. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 100, p. 199-206, 2013.

PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v.17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PAULA, M. H. **Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess)**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento Térmico**. 2014. 64f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PIERRE, F.C. **Caracterização físico-mecânica de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)–Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

PROTÁSIO, T. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, p. 1166-1185, 2013a.

PROTÁSIO, T. P. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. **Brazilian Journal Forestry Research**, Lavras, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.

PROTÁSIO, T. P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p.273-283, 2011.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14 p.

RABAÇAL, M. E. R. F. **Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. **Holzforschung**, Berlin, v.61, n.5, p. 469-477, 2007.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SILVA, D. A. et al. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SNIF-SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Recursos Florestais-As florestas plantadas**. Brasília, 25 de julho de 2014. Disponível em:<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>. Acesso em: 14/09/2017.

SOUZA, M. H.; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A. **Madeiras tropicais brasileiras**. Brasília: LPF/IBAMA, 1997. 152 p.

SPANHOL, A. et al. Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 833-844, out./dez. 2015.

STAHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel *pellets* made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, p. 4849-4854, 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, 1996.

TEMMERMAN, M. et al. Comparative study of durability test methods for pellets. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 30, p. 964 – 972, 2006.

THE INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. Biennial Review and Assessment of the world timber situation. Yokohama, 2014.  
Disponível em: <<http://www.itto.int/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

TRUGILHO, P. F. et al. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Árvore**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 144-151, 1991.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.

WAAK, R. Comércio de madeira, caminhos para um uso sustentável. São Paulo: **WWF**, 2013. Disponível em:  
[http://www.sindimasp.org.br/conteudo/download/pub\\_comercio\\_madeira.pdf](http://www.sindimasp.org.br/conteudo/download/pub_comercio_madeira.pdf). Acesso em: 22 jun. 2017.

WOLF, A.; VIDLUND, A.; ANDERSON, E.; Energy efficient *pellet* production in the forest industry: a study of obstacles and success factors. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 30, p. 38-45, 2006.

YUBA, A.N. **Cadeia produtiva da madeira serrada de eucalipto para produção sustentável de habitações**. 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

## APÊNDICE

**Tabela A1.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para o comprimento dos *pellets*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	10	1198,213591	119,821359	15,897*
Resíduo	264	1989,878840	7,537420	-
Total	274	3188,092431	-	-

\* Significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela A2.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para o diâmetro dos *Pellets*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	10	0,338236	0,033824	2,233*
Resíduo	264	3,998928	0,015147	-
Total	274	4,337164	-	-

\* Significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela A3.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para a densidade aparente unitária dos *Pellets*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	10	43003,508047	4300,350805	0,324 <sup>ns</sup>
Resíduo	264	3506816,979952	13283,397651	-
Total	274	3549820,487988	-	-

ns: não significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela A4.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para a compressão diametral dos *Pellets*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	10	189,754416	18,975442	18,678*
Resíduo	264	268,200640	1,015912	-
Total	274	457,955056	-	-

\* Significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela A5.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para a porcentagem de finos dos *Pellets*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Tratamentos	10	0,026935	0,002693	17,428*
Resíduo	44	0,006800	0,000155	-
Total	54	0,033735	-	-

\* Significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela A6.** Resumo da análise de variância em delineamento inteiramente casualizado para a durabilidade mecânica dos *Pellets*

<b>Fonte de variação</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Soma de quadrados</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F calculado</b>
Tratamentos	10	32,194138	3,219414	18,063*
Resíduo	44	7,842360	0,178235	-
Total	54	40,036498	-	-

\* Significativo a 5% de probabilidade.