



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

SANDRA BEZERRA DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA FINS
ENERGÉTICOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES
JULHO – 2016

SANDRA BEZERRA DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE DIFERENTES BIOMASSAS 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.
Orientadora: D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes
Coorientadora: D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre
Coorientador: D.Sc. Djeison Cesar Batista

JERÔNIMO MONTEIRO – ES
JULHO – 2016

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

S586c Silva, Sandra Bezerra da, 1991-
Caracterização de *pellets* de diferentes biomassas para fins energéticos / Sandra Bezerra da Silva. – 2016.
46 f. : il.

Orientador: Marina Donária Chaves Arantes.

Coorientador: Graziela Baptista Vidaurre ; Djeison Cesar Batista.

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

1. Energia. 2. Fontes renováveis. 3. Biocombustíveis. 4. Controle de qualidade. 5. Pelletização. I. Arantes, Marina Donária Chaves. II. Vidaurre, Graziela Baptista. III. Batista, Djeison Cesar. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

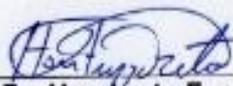
CDU: 630

**CARACTERIZAÇÃO DE PELLETS DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Sandra Bezerra da Silva

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.

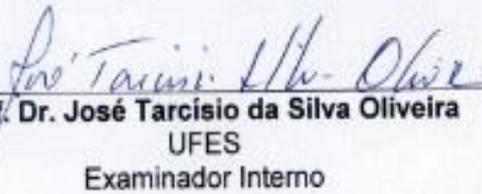
Aprovada em 15 de Julho de 2016.



Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto

UFES

Examinador Externo



Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira

UFES

Examinador Interno



Prof. Dr.ª Marina Donária Chaves Arantes

UFES

Orientadora

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por nunca me abandonar nos momentos difíceis da minha vida. E por me proporcionar tamanha felicidade, dando-me forças para chegar ao fim desta etapa.

À minha família, minha base, principalmente aos meus pais, dona Francisca Mirian Bezerra e senhor Pedro Barbosa da Silva, que nunca mediram esforços para que esse sonho se realizasse. Sonho que também era deles! Aos meus irmãos, Sônia, Saiane, Maria da Glória, Agel e Fernando, que sempre me deram apoio incondicional e foram fundamentais durante toda esta caminhada. Obrigada por tudo, sem vocês eu não teria conseguido!

Agradeço à UFES, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela oportunidade de cursar o mestrado.

À minha querida orientadora, professora Marina Donária Chaves Arantes, pelos ensinamentos, amizade e apoio na realização deste trabalho e em todos os momentos difíceis desta caminhada. Por estar sempre presente!!! Meu muito obrigada!!!

Aos meus coorientadores, professora Graziela Baptista Vidaurre e professor Djeison Cesar Batista, pelas sugestões e esclarecimentos durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Humberto Fantuzzi Neto e José Tarcísio da Silva Oliveira, por aceitaram prontamente a participar da Banca Examinadora da Dissertação.

Ao professor Thiago de Paula Protásio, por abrir as portas do Laboratório de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Goiás, regional Jataí, para produção dos *pellets* e pela compreensão nas inúmeras explicações e dezenas de e-mails. Agradeço por toda sua paciência e dedicação em repassar o máximo de conhecimento.

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/ DEF – UFV), em especial à professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Lawrence Pires pelo auxílio na realização de algumas análises.

Às empresas Raízen Energia S/A, em Jataí, Goiás, pela doação do bagaço de cana-de-açúcar e Eng-Maq pelo fornecimento do *pellet* comercial.

Aos técnicos Elecy Constantino, José Geraldo Oliveira, Gilson Barbosa São Teago e Luciano Dias pelo auxílio que foi importante para a concretização do trabalho.

À Jordão Cabral Moulin pelos conselhos ao longo da pesquisa.

À Darcy Machado e Fernando Alves, meu casal preferido, por todo apoio, amizade e por se fazerem sempre presentes durante esses dois anos. Meu muito obrigada, vocês são um presente em minha vida!

À minha grande amiga, irmã de coração, Eth Rocha, pessoa que levarei para o resto de minha vida. Agradeço pelos bons dias de convivência, pelas risadas, choros, enfim, por tornar esses dois anos mais felizes, não poderia morar com pessoa melhor. Obrigada por tudo.

À Ana Paula Câmara, uma das melhores amizades que fiz nesta caminhada, agradeço por estar sempre presente, pelos conselhos e pela ajuda durante a execução deste trabalho.

Ao meu “irmão” Jaily Kerller Batista de Andrade pela amizade estabelecida e pela ajuda nas análises do presente estudo. Ao João Gabriel Missia da Silva pela ajuda com sigma plot e Hector de Souza pela ajuda na produção dos *pellets*.

A todos os amigos do mestrado, pelo bom convívio e amizade durante esses dois anos, em especial, Alice Soares Brito, Anderson Vasconcelos Firmino, Marcos Alves Nicácio e Sara Freitas amigos que levarei para sempre em meu coração.

A todos que fizeram parte desta fase da minha vida, mesmo não estando aqui presente.

Muito obrigada!

Aos meus pais, que sempre me apoiaram nos momentos de dificuldade; com gestos e palavras mostraram-me quão importante é a realização de um sonho, e com espírito de persistência me ensinaram a cultivar meus ideais.

DEDICO.

A persistência é o menor caminho do êxito.
(Charles Chaplin)

RESUMO

SILVA, Sandra Bezerra. **CARACTERIZAÇÃO DE PELLETS DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA FINS ENERGÉTICOS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES, Orientadora: Prof^a. D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes. Coorientadores: Prof^a. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre e Prof. D.Sc. Djeison Cesar Batista.

A compactação de diferentes materiais lignocelulósicos é uma das alternativas para melhorar os problemas relacionados à produção energética e diminuir o uso de fontes derivadas de combustíveis fósseis. Diante do exposto, teve-se por objetivo avaliar a potencialidade energética de *pellets* produzidos com diferentes biomassas, tais como madeira de eucalipto de um clone do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum). Para a produção dos *pellets* utilizou-se diferentes composições. A umidade e granulometria das partículas foram determinadas de acordo com as características de cada material. Determinou-se a densidade a granel e energética; os teores de extrativos totais, lignina total, cinzas e poder calorífico superior das composições e dos *pellets*. Para os *pellets* além das análises supracitadas, determinou-se ainda, a durabilidade mecânica, teor de finos, compressão diametral, diâmetro, comprimento e densidade unitária. O processo de peletização das biomassas resultou em aumento do poder calorífico superior, densidade a granel e energética e redução da umidade dos combustíveis produzidos. Os *pellets* produzidos com duas biomassas obtiveram melhor desempenho do que aqueles produzidos com apenas uma biomassa. De modo geral, o desempenho dos *pellets* produzidos foi superior ao *pellet* comercial. Os *pellets* com 50% de capim-elefante e 50% de madeira de eucalipto se destacaram, com relação ao poder calorífico superior, densidade a granel e energética, durabilidade mecânica e densidade unitária. Os *pellets* produzidos atenderam a norma alemã em alguns requisitos.

Palavras-Chave: Energia, Fontes renováveis, Densificação.

ABSTRACT

SILVA, Sandra Bezerra. **PELLETS CHARACTERIZATION FROM DIFFERENTS BIOMASSES FOR ENERGY PURPOSES**. 2016. Dissertation (Master's degree in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes. Co-Advisors: Professor. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre and Prof. D.Sc. Djeison Cesar Batista.

Compressing different lignocellulosic materials is one of the alternatives to improve the problems related to energy production and reduce the use of sources derived from fossil fuels. The aim of this work was to evaluate the energy potential of pellets with different biomasses, such as eucalyptus wood from a clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, sugarcane bagasse (*Saccharum officinarum* L.) and elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum). To the production of pellets were used different biomasses. The moisture content and particle size were determined according to the characteristics of each material. In addition to the pellets of the above analysis, it was determined yet, it was determined bulk and energy density; the extractives content, total lignin, ash and upper calorific value of the compositions and pellets. It was determined yet, the mechanical life, fines content, diametrical compression, diameter, length and density unit. The pelletizing process of biomass resulted in increased upper calorific value, bulk density and energy and reduction of moisture of the fuels. The pellets produced with two biomasses performed better than those produced with only one biomass. In general, the performance of the pellets produced was superior to the commercial pellet. Pellets with 50% of elephant grass and 50% eucalyptus wood shawm better in relation to the upper calorific value, bulk density and energy, mechanical durability and unit density. The pellets produced to attended the German standard on some requirements.

Keywords: Biomass, renewable sources, densification.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Biomassas para uso energético	13
3.2 Peletização de biomassa.....	18
4 Material e métodos.....	22
4.1 Origem e caracterização da biomassa.....	22
4.2 Produção dos <i>pellets</i>	24
4.3 Avaliação das propriedades dos <i>pellets</i>	24
4.4 Delineamento experimental	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Caracterização química das composições e dos <i>pellets</i> produzidos ...	26
5.2 Propriedades físicas e energéticas das biomassas e dos <i>pellets</i>	29
6 CONCLUSÕES	38
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia em substituição aos combustíveis fósseis tornou-se uma questão relevante para o futuro do desenvolvimento econômico mundial, porque estas fontes contribuem para o aumento do efeito estufa. Entre as soluções possíveis, a biomassa se destaca como oportunidade de médio e longo prazo, especialmente no Brasil, País propício ao desenvolvimento de várias culturas agrícolas e florestais, devido a fatores relacionados ao clima e ao solo.

Somado a isso, a demanda por *pellets* de fontes renováveis é uma alternativa que pode crescer no mercado brasileiro, por se tratar de biocombustíveis sólidos de alto valor energético. Estudos técnico-econômicos de peletização deverão ser realizados para investigar as características do produto, relacionando-as a sua qualidade, visando o comércio interno e externo.

Apesar do pouco conhecimento e do baixo emprego de *pellets* no Brasil, o País possui um potencial promissor a ser explorado, o que permitiria o aproveitamento mais racional da biomassa disponível, reduzindo o atual desperdício de resíduos industriais e agrícolas. Como consequência, haveria a possibilidade da redução do custo da energia consumida nos setores industriais e domésticos, além de uma provável redução nos níveis de poluição, resultando na substituição parcial dos combustíveis fósseis por fontes renováveis de origem vegetal.

De acordo com Oliveira (2015), o uso sustentável da energia renovável pela biomassa por meio dos *pellets* traria investimentos internacionais de US\$ 450 bilhões entre 2015 e 2030, contribuindo assim, para a oferta energética do País, reduzindo os resíduos das indústrias de base florestal, melhorando a preservação ambiental.

Algumas alternativas para produção desses combustíveis é a utilização de matérias-primas de curta rotação, como o eucalipto (*Eucalyptus* sp.) proveniente de florestas plantadas, o bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e a forrageira capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.).

A implantação de florestas de eucalipto de rápido crescimento, visando a maior produção de biomassa florestal em plantios de curta rotação é uma característica favorável ao desenvolvimento de florestas para fins energéticos.

O bagaço de cana-de-açúcar é um dos resíduos gerados em maior quantidade no País, com grande potencial para produção de energia, em que inúmeras empresas brasileiras já utilizam essa biomassa para esse fim.

Outra espécie com alto potencial energético é o capim-elefante, com a possibilidade de até duas colheitas anuais, com alta produtividade anual de massa seca. Contudo, não existem muitos estudos dessa espécie com vistas à produção de energia.

O uso de fontes alternativas de energia e a realização de pesquisas nesse tema são importantes para minimizar os problemas relacionados à produção energética atual. O desenvolvimento de pesquisas sobre *pellets* e o conhecimento gerado delas irá contribuir para auxiliar a diversificação da matriz energética do País, popularizar o uso desses combustíveis, sobretudo, incentivando a utilização de fontes renováveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso de três diferentes biomassas para a produção de *pellets*.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a influência das composições de biomassa contendo capim-elefante, bagaço de cana-de-açúcar e madeira de eucalipto na produção e qualidade dos *pellets*.
- Determinar a proporção ideal de capim-elefante, madeira de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para a produção de *pellets*.
- Comparar as propriedades dos *pellets* produzidos com um *pellet* comercial produzido com eucalipto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassas para uso energético

A busca por novas fontes de energia é estimulada pelas mudanças climáticas, decorrentes de grandes emissões de gases do efeito estufa no mundo. Desta forma, buscam-se alternativas para a minimização do uso dos combustíveis fósseis por novas fontes energéticas, que possam garantir a sustentabilidade ambiental.

O Brasil possui números significativos de utilização e oferta de energia de biomassa. De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE – referentes ao ano de 2012, 6,8% de toda energia elétrica disponível no País foi gerada por biomassa, e que 30,4% da energia gerada pelas termelétricas são provenientes da utilização de biomassa. Referente à oferta de energia no País em 2011, 9,1% foi de biomassa de lenha e carvão vegetal e 15,4% foi de biomassa de cana-de-açúcar (EPE, 2013).

Inúmeras espécies estão sendo pesquisadas para a produção energética, dentre elas, a biomassa das florestas. O gênero *Eucalyptus* é conhecido por sua grande variabilidade genética e é utilizado para inúmeras finalidades, em virtude do número de espécies com propriedades físicas e químicas diferentes (PEREIRA et al., 2000).

O estabelecimento de florestas de *Eucalyptus* de rápido crescimento, visando a maior produção de biomassa florestal para suprimento energético em plantios de curta rotação ganha posição de destaque no contexto brasileiro, uma vez que a madeira ocupa a terceira posição entre os produtos energéticos primários mais consumidos, ficando atrás apenas da hidráulica e eólica.

No Brasil, o *Eucalyptus* é um dos gêneros florestal mais utilizado nos 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 florestal (SANTOS et al., 2005; CHAVES et al., 2013).

A produtividade do eucalipto, decorrente do seu rápido crescimento, foi um dos principais fatores que determinaram sua expansão nos mercados de polpa e papel, carvão vegetal, e também, serraria (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).

Um das alternativas para maximizar a utilização dessas espécies na área energética, seria os plantios de curta rotação, compreendido como sendo um modelo de produção florestal relacionado a uma cultura intensiva de plantios florestais em sistema de talhadia, com vantagem de produzir lucro mais rápido e em intervalos regulares, de curta duração (MCKENNEY et al., 2014).

O gênero *Eucalyptus* é utilizado em florestas de curta rotação em virtude do seu rápido crescimento e capacidade de formação de copa (KNAPIC et al., 2014).

A estrutura anatômica, principalmente em relação a espessura da parede, a composição química e as propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus* são essenciais 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, teor de carbono fixo e outras propriedades almejadas na sua utilização como termorreductor (CAMPOS, 2008).

Para fins energéticos, o melhoramento enfatiza as espécies de eucalipto que têm elevado potencial produtivo, alta densidade e alto teor de lignina, pois o rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso da madeira mais densa, de maior poder calorífico e com teor de carbono igual ou superior a 75% (PALUDZYSYN FILHO, 2008).

De acordo com Pereira et al. (2000), as principais vantagens na utilização de madeiras mais densas são: a) menor área de estocagem e manuseio da madeira; b) maior rendimento energético; c) maior rendimento das caldeiras para queima direta; e) maior rendimento dos gaseificadores para produção de gasogênio ou gás de síntese do metanol; f) maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida.

A madeira possui grande potencial como fonte energética, porém a busca por outras biomassas é interessante para reduzir a dependência dessa matéria-prima e descentralizar a produção. Nesse contexto, tem-se a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), que também vem sendo utilizada em larga escala visando a produção de energia.

No Brasil, dentre as matérias-primas de biomassa mais utilizadas têm-se o bagaço de cana-de-açúcar, que é o resíduo final da retirada do caldo da cana-de-açúcar nas usinas que produzem álcool e açúcar, posicionando o País entre os

maiores produtores do mundo, conforme dados do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2011).

O setor sucroenergético, produziu um total de 177 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar no ano de 2015 (EPE, 2015). Devido à grande quantidade produzida e a suas características físicas e químicas, os resíduos de cana-de-açúcar encontram um vasto campo de utilização, dentre eles na produção de ração animal, na indústria química, na fabricação de papel, papelão e aglomerados, como material alternativo na construção civil, e na produção de biomassa microbiana.

Conforme o presidente da empresa Cosan Biomassa, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo capaz de produzir até 80 milhões de toneladas por ano de bagaço de cana-de-açúcar (COSAN, 2016).

No Brasil, existem diversas empresas que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar no abastecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica. A Cosan, por exemplo, localizada no estado de São Paulo, iniciou recentemente sua produção e deve consumir cerca de 175 mil toneladas/ano (NOVA CANA, 2016). Empresas como a Raízen Energia S.A. e a processadora de soja Caramuru Alimentos S.A. também utilizam a cana-de-açúcar como fonte de energia.

Outra espécie com potencial energético é o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.), cultura comumente utilizada na alimentação de animais. Há alguns anos, esta espécie vem sendo estudada para fins energéticos por apresentar características favoráveis a este uso, além de boa produtividade e técnicas de produção já dominadas. O capim-elefante é uma espécie de rápido crescimento e que possui alto potencial para utilização não apenas como fonte alternativa de energia, mas também para a obtenção de carvão vegetal utilizado na produção industrial de ferro gusa (MORAIS, 2008).

Pertencente à família Poaceae, subfamília Panicoideae, o capim-elefante é originário do continente africano, mais exatamente da África Tropical, apontada como o centro de origem e de variabilidade genética da espécie. Os territórios da Guiné, Moçambique, Angola, Zimbábue e sul do Quênia são relacionados como as principais áreas de biodiversidade desta forrageira (FERREIRA; PEREIRA 2005).

O capim-elefante pode ser caracterizado como uma gramínea perene, de hábito de crescimento cespitoso, atingindo de três a cinco metros de altura (LIMA, 2010). Possui grande variabilidade genética, possuindo mais de duzentas variedades, sendo Cameroon, Gramafante, Guaçu, Roxo e BAG 2 as mais conhecidas, além de

características desejáveis como alto rendimento e boa qualidade para uso como fonte alternativa de energia (MAZZARELLA, 2013). Pode ser utilizado na combustão direta, queimado em forma de briquetes ou *pellets*, na geração de energia térmica ou elétrica, em usos agrícolas e industriais que demandam calor (MAZZARELLA, 2013).

O maior diferencial do capim-elefante, quando comparado ao eucalipto é que a espécie permite duas colheitas por ano e tem uma longa vida produtiva, sendo possível produzir de 20 a 60 toneladas de matéria seca $\text{há}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Isso porque se trata de uma espécie perene, de metabolismo fotossintético C4, ou seja, entre aquelas com maior eficiência no aproveitamento da luz, resultando em uma grande capacidade de produção de matéria seca (SOMMERVILLE et al., 2010; VILELA; CERIZE, 2010).

O capim-elefante é uma espécie amplamente difundida por todo o Brasil, cultivada em condições ambientais contrastantes e destaca-se entre as forrageiras mais utilizadas em sistemas intensivos de produção animal, por conta de sua alta produtividade (LIMA, 2010). Além disso, possui relevância quanto a sua utilização para produção de biomassa.

Quando comparado a outras fontes de biomassa, como o bagaço de cana-de-açúcar e o eucalipto, percebe-se que o capim-elefante é uma das fontes de maior potencial produtivo (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação de produtividade de energia por hectare de diferentes fontes de biomassa

Fontes de energia	Energia produzida	
	Kcal kg^{-1}	Kcal $\text{kg}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (milhões)
Capim-elefante Carajás	4.200	189
Capim <i>Brachiaria brizantha</i>	3.900	97,5
<i>Eucalyptus grandis</i>	4.641	92,82
Bagaço de cana-de-açúcar	3.700	29,6

Fonte: Adaptado de Vilela e Cerize (2010).

Conforme observado, a energia produzida por quilograma de capim-elefante é inferior à do *Eucalyptus grandis*, principal fonte atual de matéria-prima para produção de carvão vegetal, porém, sua energia gerada por hectare (ha) anualmente é superior às demais fontes de biomassa. Isso porque enquanto o eucalipto produz até 20 toneladas de matéria seca por hectare por ano, estudos demonstram que o capim-elefante pode produzir entre 20 e 60 toneladas. Além disso, uma floresta de eucalipto necessita de sete anos para crescer até que seja possível utilizá-la como fonte de

biomassa, enquanto a primeira colheita de capim-elefante pode ser realizada após cento e oitenta dias (VILELA; CERIZE, 2010).

A produção de material energético alternativo de biomassa vegetal representa um desafio para a ciência. Uma vez que, diferente do que acontece para o eucalipto, não existem muitos estudos de melhoramento genético para o capim-elefante com vistas à produção de energia, podendo haver variedades com maior potencial produtivo e características físicas e químicas desejáveis para tal uso (LIMA, 2010; MAZZARELLA, 2013).

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de substituir o carvão mineral utilizado na redução de pelotas de minério de ferro por carvão derivado de biomassa seca de capim-elefante (HUBER; DALE, 2009; QUESADA, 2004;). Menciona-se o caso de pesquisadores da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) que desenvolveram uma técnica denominada carvocapim, um tipo de carvão vegetal produzido de cultivares de capim-elefante (MANDARIM, 2013).

Os resultados indicaram que o carvão produzido com capim-elefante possui boas características energéticas, considerando-se a espécie como potencial fonte energética alternativa sustentável (MANDARIM, 2013).

Conforme mencionado por Lima (2010), a utilização de cultivares de eucalipto melhoradas para fins energéticos é uma necessidade comum dos produtores de todo País. A procura por novas variedades adaptadas aos diferentes ecossistemas é intensa, desde que possuam maior crescimento e produtividade, melhor eficiência energética e na absorção de nutrientes, distribuição mais equitativa da produção de matéria seca durante o ano e resistência a pragas e doenças.

Mello et al. (2004) analisaram 15 clones de capim-elefante cultivados em Pernambuco e verificaram que a altura da planta se correlacionou positivamente com a produção de lâmina foliar. Isso evidenciou que plantas mais altas tendem a uma maior produção de folhas, observando ainda uma relação positiva entre a produção de matéria seca e a altura da planta.

Segundo Marafon (2015) com dois cortes anuais, extrai-se entre 150 e 200 toneladas de massa fresca por hectare cultivado de capim-elefante, o que rende de 40 a 50 toneladas de massa seca. Além da alta produtividade, é possível a mecanização da colheita e a manutenção de um fluxo contínuo de abastecimento de matéria-prima ao longo do ano, que são algumas das vantagens da utilização dessa espécie para fins energéticos.

A produção de biomassa de capim-elefante para fins energéticos em comparação com eucalipto e pinus possui como vantagens a alta produtividade, sem requerer grandes investimentos com adubação; permite duas colheitas anuais e o retorno mais rápido do capital investido; sistema de produção desenvolvido, com técnicas já consolidadas (MAZZARELLA, 2013).

Mazzarella (2013) também mencionou algumas desvantagens da utilização do capim-elefante como fonte energética, entre elas a dificuldade de secagem natural (o material pode apodrecer em condições inadequadas de colheita, necessitando de uma secagem com gasto de energia) e a baixa densidade a granel, o que inviabiliza o armazenamento e o transporte a maiores distâncias, necessitando de prévia compactação. Há também a questão da menor credibilidade no mercado em virtude de poucos estudos realizados, ou seja, há desconhecimento do verdadeiro potencial energético da espécie.

3.2 Peletização de biomassa

O processo de peletização de biomassa consiste na compactação da matéria-prima em uma matriz de peletização com a aplicação de alta pressão, obtendo como resultado os *pellets*, com diâmetros e comprimentos variáveis (STAHL; BERGHEL, 2011).

Os *pellets* são biocombustíveis sólidos, granulados, cilíndricos, uniformes e com alta densidade energética; são fontes de energia renovável, limpa e eficiente, resultando em um combustível sólido produzido de biomassa florestal ou agrícola e resíduos gerados no processamento desses materiais (CARVALHO, 2011). Segundo o mesmo autor, de maneira geral, os *pellets* possuem teor de cinzas abaixo de 0,5% e umidade inferior a 10%, o que proporciona uma combustão eficiente e praticamente limpa com elevado valor energético.

Uma das vantagens dos *pellets* é a elevada densidade (geralmente superior a 600 kg m^{-3}), o que facilita e aperfeiçoa as operações de armazenamento e de transporte, principalmente a longas distâncias (RASGA, 2013).

Normalmente, os *pellets* têm diâmetro variável entre 6 e 10 mm, atingindo no máximo 30 mm de comprimento, geometria regular e cilíndrica. Isso permite tanto a alimentação automática em sistemas industriais quanto a alimentação manual nos

aquecedores residenciais, porque é um produto natural e, em sua maioria, não têm elementos tóxicos na sua composição (GARCIA, 2013).

Os principais aspectos a serem considerados para viabilização do processo produtivo de *pellets* são o teor de umidade, tamanho e forma das partículas e a densidade da biomassa a ser utilizada. A pressão de compactação e a temperatura do processo também devem ser levados em consideração (WARAJANONT; SOPONPONGPIPAT, 2013).

A cadeia produtiva de *pellets*, segundo Couto (2004), pode ser disposta em oito estágios, como demonstrado na Figura 1.

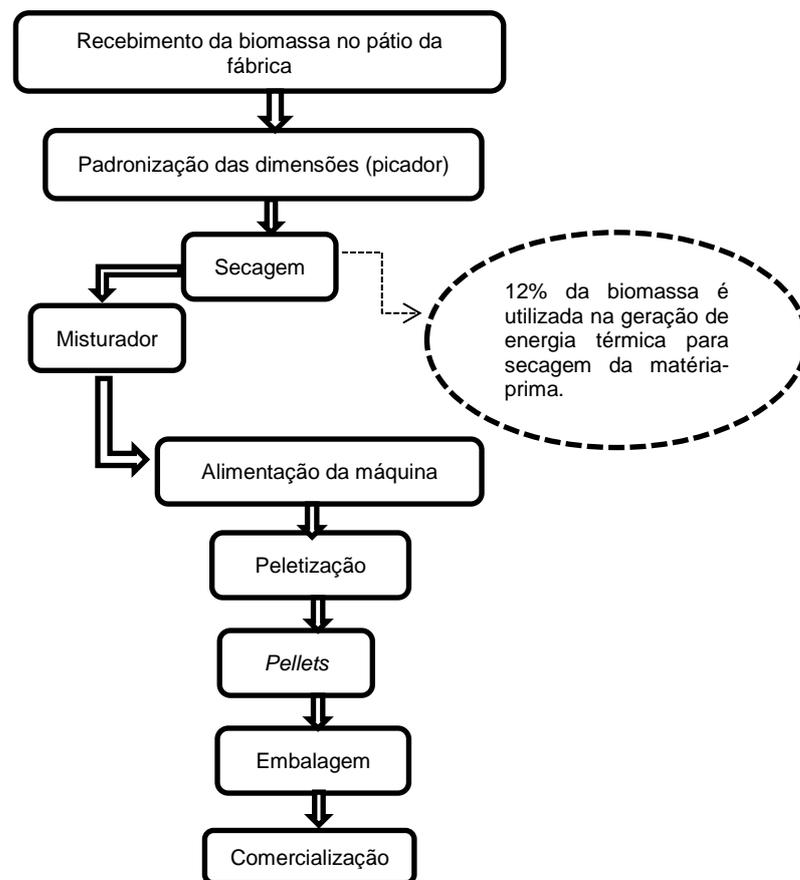


Figura 1. Diagrama com sequência geral de fabricação de *pellets*

Fonte: Couto et al. (2004).

Os principais países produtores de *pellets* estão na América do Norte e Europa, a saber, Canadá, Alemanha, Suécia e Estados Unidos e os principais consumidores em larga escala do produto são Bélgica, Dinamarca, Holanda, Suécia e Reino Unido (ROOS; BRACKLEY, 2012).

Alguns países têm utilizado normatizações próprias, como a Suécia (*Swedish Pellet Standard SS 18 71 20* e *Swedish Briquette Standard SS 18 71 21*), Finlândia, Áustria (*ÖNORM M 1735*) e Alemanha (*DIN 51731/DIN plus*) (SANDER, 2011).

De acordo com Garcia (2010), no Brasil ainda não existem normas de padronização e caracterização de *pellets*. Diferente do mercado brasileiro, o europeu já vem desenvolvendo normatização para produção, transporte e utilização de *pellets*.

Conforme levantamento da Associação Brasileira das Indústrias de *Pellets* – ABIPEL, o Brasil tem grande potencial de aproveitamento de biomassa florestal para produção de *pellets*, uma vez que possui condições geográficas favoráveis, grande quantidade de terra agricultável com características tecnológicas adequadas e condições climáticas que possibilitam múltiplos cultivos ao longo de um único ano (ABIPEL, 2013), por estas razões, o País possui potencial para liderar a produção e uso energético da biomassa em grande escala.

Os *pellets* estão tornando-se populares no Brasil e diversas empresas têm anunciado altos investimentos neste biocombustível, como a SER-Suzano Energia Renovável, que produziu no Estado do Maranhão em 2014 dois milhões de toneladas de *pellets* para aplicações industriais. Conforme dados de 2013, haviam 14 indústrias de *pellets* com capacidade instalada para produzir até 460 mil toneladas/ano (ABIPEL, 2013).

Em geral, as indústrias que produzem *pellets* são de pequeno porte e tem baixa capacidade produtiva, produzem de 0,5 a 4,0 t/h (ABIPEL, 2013). Além disso, questões tecnológicas como a baixa eficiência, baixo volume e o alto custo da produção limitam a sua utilização ao mercado interno e, dificultando as exportações (GARCIA, 2016).

De acordo com dados de 2014, a produção das indústrias brasileiras (aproximadamente 81,4%) estava concentrada na região Sul, distribuída pelos estados de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os 18,6% restantes da produção estavam concentrados no estado de São Paulo (região sudeste), principalmente para aproveitar os subprodutos das indústrias de base florestal, uma vez que o surgimento desse combustível no País está mais relacionado à necessidade de agregar valor aos resíduos das indústrias madeireiras (ABIPEL, 2014).

No mercado interno brasileiro, os *pellets* têm custo de produção entre R\$ 290 e R\$ 380/t e são vendidos por preços que variam entre R\$ 390 a R\$ 650/t (GARCIA, 2014). No processo de fabricação dos *pellets* os altos custos da produção, ou seja,

os custos vinculados ao maquinário e transporte são os principais desafios encontrados pelos produtores desses combustíveis, o que na maioria das vezes inviabiliza a produção.

Produzir mais, com melhor qualidade e com o menor custo é a chave para que esses produtores se tornem competitivos com os principais produtores mundiais (Estados Unidos da América, Canadá, Rússia e Alemanha) e alcancem o mercado mais rentável da exportação.

No Brasil, os principais consumidores de *pellets* são as indústrias, pizzarias, padarias, hotéis e parques aquáticos. Mas o consumo ainda é pequeno quando comparado ao europeu, que utiliza-o para aquecimento interno no comércio, indústria e, principalmente, residencial (GARCIA, 2014).

No Brasil, assim como em outros países, as empresas estão diversificando a utilização desses biocombustíveis, com boa rentabilidade aos produtores; por exemplo, nos *pet shops*, pode-se encontrar um granulado higiênico que absorve o cheiro dos dejetos dos gatos (GARCIA, et al., 2011).

Porém, para o desenvolvimento e consolidação do mercado de *pellets* no Brasil, haverá a necessidade de sua regulamentação e fiscalização, com o intuito de normatizar e padronizar suas características e propriedades, como em países da Europa e Estados Unidos da América, principalmente, promovendo as adaptações, quanto ao processo de produção, necessárias para a utilização das biomassas produzidas no País (RASGA, 2013).

4 Material e métodos

4.1 Origem e caracterização da biomassa

Para a produção dos *pellets* foram utilizados três tipos de biomassa como fontes de matéria-prima: madeira de eucalipto de um clone do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com 12 meses de idade, proveniente de um plantio no estado do Espírito Santo; bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), doado pela empresa Raízen Energia S/A, em Jataí, Goiás; e capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.) com cinco meses de idade, oriundo de um plantio experimental da Universidade Federal do Espírito Santo, no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo.

As biomassas foram secas naturalmente, trituradas em moinho de martelo e classificadas em peneira com abertura de 5 mm de diâmetro. Em seguida, foram realizadas composições (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição das biomassas para produção dos *pellets*

Composição	Abreviação
Eucalipto (100%)	E
Capim elefante (100%)	CE
Bagaço de cana-de-açúcar (100%)	BC
Capim-elefante (50%) + eucalipto (50%)	CE50+E50
Capim-elefante (75%) + eucalipto (25%)	CE75+E25
Capim-elefante (25%) + eucalipto (75%)	CE25+E75
Capim-elefante (50%) + bagaço de cana-de-açúcar (50%)	CE50+BC50
Capim-elefante (75%) + bagaço de cana-de-açúcar (25%)	CE75+BC25

Fonte: O autor (2016).

Foram determinadas a umidade, densidade a granel; os teores de extrativos totais, lignina total, cinzas e poder calorífico superior na caracterização das biomassas *in natura* e também das composições utilizadas na produção de *pellets* para fins energéticos.

A umidade (em base úmida) foi determinada de acordo com a metodologia descrita na norma DIN EN 14774-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010a), em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$.

A densidade a granel foi realizada de acordo com a norma do *Deutsches Institut Für Normung* - DIN EN 15103 (Deutsches Institut Für Normung, 2010c).

Para caracterização química, foram determinados os teores de extrativos em álcool:tolueno, segundo especificações da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M/68 (ABTCP, 1968) e da norma T204 da *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI, 1998); os teores de lignina insolúvel, pelo método Klason (GOMIDE; DEMUNER, 1986) e de lignina solúvel por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), com base na diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma DIN EN 14775 (Deutsches Institut Für Normung, 2009).

O poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) foi obtido em um calorímetro digital adiabático, de acordo com a norma DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b) e, o poder calorífico inferior (base seca) foi estimado mediante a Equação 1, uma vez que não foi possível a obtenção do valor de hidrogênio do material.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 324 \quad (1)$$

Em que – PCI: poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}); PCS: poder calorífico superior (kcal kg^{-1}).

O poder calorífico líquido foi estimado com base na Equação 2:

$$\text{PCL} = \frac{[(\text{PCI} - (6 \cdot \text{Ubs}))]}{(100 + \text{Ubs})} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que – PCL: poder calorífico líquido (kcal kg^{-1}); PCI: poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}); Ubs: umidade média na base seca (%).

A densidade energética (GJ m^{-3}) foi obtida por meio da multiplicação do poder calorífico líquido pela densidade a granel do material.

4.2 Produção dos *pellets*

Em virtude das características da peletizadora, não foi possível peletizar as composições 100% madeira de eucalipto e capim-elefante (25%) + eucalipto (75%), uma vez que o equipamento era apropriado para peletização de madeiras menos densas, mesmo a madeira de eucalipto utilizada sendo de 12 meses.

Para a produção dos *pellets* utilizaram-se as diferentes composições das biomassas descritas na Tabela 2. A granulometria e a umidade das composições foram ajustadas com base em testes preliminares, de acordo com as características de cada material, pois com a umidade e granulometria inicial não foi possível peletizar o material.

A granulometria das partículas de capim-elefante e madeira de eucalipto foi de 5 mm de diâmetro e do bagaço de cana-de-açúcar foi de 3 mm. O ajuste de umidade das partículas das biomassas foi realizado com auxílio de um pulverizador manual, em que a água era aspergida nas partículas e, posteriormente, realizava-se a secagem natural e a determinação da umidade. A umidade de peletização foi de 15, 16, 13, 14 e 12%, respectivamente para CE, BC, CE50+E50, CE75+E25, CE50+BC50 e CE75+BC25.

A peletização foi realizada em uma prensa peletizadora laboratorial da marca Eng-Maq®, modelo 0200v, com matriz plana horizontal e capacidade para produção de 110 kg h⁻¹. O diâmetro interno e o comprimento nominais dos canais de compressão da matriz eram de 6 mm e 20 mm, respectivamente. Para alimentação da peletizadora, utilizou-se um sistema composto por um motor elétrico, um controlador de velocidade e uma rosca sem-fim.

A temperatura de peletização foi de 80 °C para CE, BC, CE50+BC50 e CE75+BC25 e de 95 °C para CE50+E50 e CE75+E25, e a pressão de compactação foi de aproximadamente 300 kgf cm⁻². A velocidade de rotação dos roletes durante a produção dos *pellets* foi de 1.500 rpm. Produziram-se aproximadamente 1,5 kg de *pellets* por lote, sendo três lotes por composição.

4.3 Avaliação das propriedades dos *pellets*

Além dos *pellets* produzidos em laboratório foi avaliado uma amostra de *pellet* comercial de madeira de eucalipto, que é comercializada apenas no mercado interno.

A caracterização dos *pellets* (determinação da umidade, densidade a granel, análise química imediata e poder calorífico superior) seguiu os mesmos procedimentos utilizados para caracterização das composições das biomassas antes da compactação.

A taxa de compactação dos *pellets* foi calculada dividindo-se a densidade a granel dos *pellets* pela densidade a granel das composições. A densidade energética (MJ m^{-3}) foi obtida por meio da multiplicação do poder calorífico líquido pela densidade a granel dos *pellets*, conforme proposto por Obernberger e Thek (2010).

O diâmetro e o comprimento dos *pellets* foram obtidos seguindo a norma DIN EN 16127 (Deutsches Institut Für Normung, 2012b), com medição de 100 *pellets* por composição.

A densidade aparente unitária dos *pellets* foi determinada pelo método estereométrico, ou seja, o volume foi calculado considerando-se a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa de 100 repetições por composição.

A durabilidade e a porcentagem de finos dos *pellets* foram determinadas utilizando o equipamento Ligno-Tester Holmen®, de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010d), com cinco repetições para cada composição. As amostras de *pellets* foram ventiladas por meio de um jato de ar que simula a destruição natural dos *pellets* durante o transporte e manuseio, em uma câmara com formato de pirâmide quadrangular invertida. Para a determinação da porcentagem de finos, o fluxo de ar foi de 30 segundos e a pressão de 30 mbar. Posteriormente, as amostras sem finos foram submetidas a outro fluxo de ar controlado (70 mbar) durante 60 segundos para determinação da durabilidade mecânica.

Avaliou-se a resistência à compressão diametral dos *pellets* (Equação 3), de forma semelhante à realizada por Cubero-Abarca et al. (2014), utilizando-se para cada composição cinquenta *pellets* amostrados aleatoriamente.

$$\text{Compressão diametral} = \frac{2. \text{ Força máxima (N)}}{\pi. \text{ Diâmetro (mm)}. \text{ Comprimento (mm)}} \quad (3)$$

O ensaio foi realizado com velocidade de 2 mm min^{-1} em máquina de ensaio universal, utilizando-se uma célula de carga com capacidade para 500 quilos. Na ausência de normas específicas para os testes mecânicos em *pellets*, o procedimento foi realizado com adaptação da NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.4 Delineamento experimental

Para a caracterização química, poder calorífico superior e densidade energética das composições e *pellets* foi realizada apenas estatística descritiva.

Para as demais propriedades avaliadas nos *pellets* foi considerado um delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos (seis composições mais o *pellet* comercial) e diferentes números de repetições. Para a comparação múltipla das médias, utilizou-se o teste Scott-Knott, a 5% de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização química das composições e dos *pellets*

Na Tabela 3 encontram-se os resultados das análises realizadas nas biomassas e nos *pellets*.

Tabela 3 – Médias de extrativos totais, lignina total, cinzas e material volátil das biomassas e dos *pellets*, por composição

	Composições	TET (%)	TLT (%)	TCZ (%)	TMV (%)
Biomassa	CE	14,39	20,81	7,27	80,98
	E	2,84	29,81	0,58	84,20
	BC	18,25	21,30	1,88	83,07
	CE50+E50	10,84	23,50	3,29	83,98
	CE75+E25	11,41	23,12	5,68	82,54
	CE50+BC50	11,04	21,11	4,64	82,42
	CE75+BC25	12,76	23,01	5,30	82,83
Pellets	CE	13,90	21,13	6,48	81,20
	BC	17,38	22,81	2,40	84,27
	CE50+E50	7,07	24,91	2,89	86,24
	CE75+E25	10,54	23,45	4,00	84,68
	CE50+BC50	10,34	21,85	4,80	83,31
	CE75+BC25	11,49	21,71	5,30	83,00
	PC	3,41	29,77	1,28	86,68

CE: capim-elefante -100%; E: eucalipto - 100%; BC: bagaço de cana-de-açúcar - 100%; CE50+E50: capim-elefante - 50% + eucalipto - 50%; CE75+E25: capim-elefante - 75% + eucalipto -25%; CE50+BC50: capim-elefante -50% + bagaço de cana-de-açúcar - 50%; CE75+BC25: capim-elefante - 75% + bagaço de cana-de-açúcar - 25%; PC: *pellet* comercial; TET: teor de extrativos totais; TLT: teor de lignina total; TCZ: teor de cinzas e TMV: teor de material volátil.

Fonte: O autor.

Apesar da composição 100% madeira de eucalipto não ter sido peletizada, os resultados da caracterização química deste material estão contidos neste item para auxiliar na discussão dos resultados das composições com esta matéria-prima. A madeira de eucalipto obteve os menores valores para teor de extrativos e cinzas e as maiores médias para teor de lignina e materiais voláteis, quando comparado às demais composições.

Observa-se que ocorreu uma alteração na quantidade de constituintes químicos orgânicos e inorgânicos em função da composição da biomassa e de suas composições.

A quantidade absoluta de extrativos solubilizados em álcool:tolueno foi superior para o bagaço de cana-de-açúcar (BC) e, conseqüentemente, para *pellets* produzidos com essa biomassa lignocelulósica, seguido do capim-elefante. O teor absoluto de extrativos totais dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar (BC) e capim-elefante (CE) foram 5,1 e 4,1 vezes maiores, respectivamente, que o do *pellet* comercial (PC).

Essa alta diferença entre os teores de extrativos refere-se as composições distintas das biomassas.

O elevado teor de extrativos do bagaço de cana-de-açúcar (18,25%) deve-se, principalmente, à fração residual de sacarose e polissacarídeos de baixa massa molar não removidos durante a moagem (PEREIRA, 2014). Altos teores de extrativos no bagaço de cana-de-açúcar (19,68%) também foram observados por Pereira (2014), que estudou uma variedade plantada em Ponte Nova, Minas Gerais.

A presença de elevados teores de extrativos é uma característica vantajosa para produção de energia, uma vez que estes componentes possuem elevado poder calorífico (GUO et al., 2010; TELMO; LOUSADA, 2011).

De acordo com Quesada (2004), o potencial energético da biomassa está relacionado ao teor de carbono contido na lignina. Observa-se que a densificação ocorrida no processo de peletização aumentou o teor absoluto de lignina dos *pellets* comparativamente às biomassas, em que o maior teor absoluto de lignina (29,77%) foi observado para o *pellet* comercial. A segunda maior média absoluta foi dos *pellets* produzidos com 50% de madeira de eucalipto em sua composição, sendo 17% menor que a do *pellet* comercial.

Maiores teores de lignina são desejáveis para o processo de peletização, uma vez que, esse componente atua como agente de ligação natural, ou seja, quanto maior o teor de lignina, conseqüentemente, melhor será a aglutinação entre as partículas.

Uma característica indesejável para produção de *pellets* é a quantidade de minerais. Os maiores teores absolutos de cinzas foram encontrados nas composições e *pellets* produzidos com elevadas quantidades de capim-elefante. Vale ressaltar que o capim-elefante possui grande quantidade de sílica em sua composição, que compõe grande parte da fração determinada como cinzas (PEREIRA, 2014).

Nakanishi (2013) pesquisou a cinza residual da queima de biomassa do capim-elefante e encontrou altos valores de sílica para este material, em que, colmo + bainha, folha e planta inteira apresentaram teores de sílica de 31,90; 47,50 e 43,30%, respectivamente.

Elevados teores de cinzas são indesejáveis, visto que geram maiores quantidades de resíduo após o processo de combustão da biomassa, exigindo um sistema próprio para sua retirada, além de promover o desgaste por abrasão dos equipamentos de combustão. Outro aspecto negativo é a redução do poder calorífico, uma vez que as cinzas não fornecem energia no momento da combustão (VITAL et al., 2013). A mesma relação foi observada no presente trabalho, conforme será exposto a seguir, nos quais os *pellets* com maior percentual de cinzas obtiveram os menores poderes caloríficos.

Rendeiro et al. (2008) afirmaram que as cinzas são compostas por substâncias inorgânicas e metálicas, em que o teor de cinzas da biomassa varia de 0,1%, no caso da madeira, até 15% em alguns materiais agrícolas.

Os *pellets* produzidos BC, CE50+E50, CE75+E25, CE50+BC50 e o *pellet* comercial atenderam à norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012a) quanto ao teor de cinzas e foram classificados como *pellets* do tipo A, porque apresentaram médias inferiores a 5%. As exceções foram os *pellets* produzidos com 100% capim-elefante (CE) e os de 75% capim-elefante e 25% bagaço de cana-de-açúcar (CE75+BC25), que foram classificados como *pellets* do tipo B.

Os *pellets* obtiveram valores superiores de materiais voláteis, quando comparados às biomassas antes da compactação. Maiores médias absolutas de teor de materiais voláteis foram observadas no *pellet* comercial (86,68%) e CE50+E50 (86,24%), ou seja, naqueles produzidos com maior quantidade de madeira de eucalipto em sua composição.

Brand (2010) observou que o teor de voláteis para a biomassa de eucalipto está entre 75 e 85%, valor condizente aos apresentados no presente trabalho. O autor ainda relata que a biomassa com maior teor de voláteis e menor teor de cinzas

apresenta, normalmente, maior poder calorífico, o que também foi observado no presente trabalho.

Um alto teor de materiais voláteis também pode afetar o processo de combustão em geral (VIEIRA, 2012), ou seja, combustíveis com essa característica são mais rapidamente queimados.

5.2 Propriedades físicas e energéticas das biomassas e dos *pellets*

Na Tabela 4 encontram-se os resultados de poder calorífico superior das biomassas e dos *pellets*, além de algumas propriedades físicas correlatas, de acordo com as diferentes composições.

Tabela 4 – Médias de densidade a granel, taxa de compactação, umidade e poder calorífico superior das biomassas e dos *pellets*

	Composições	Densidade a granel (kg m ⁻³)	TC	Ubs (%)	PCS (MJ kg ⁻¹)
Biomassa	CE	132,92c	-	15,02 d	17,00
	BC	113,74a	-	16,03 e	17,45
	CE50+E50	168,15e	-	12,45 a	17,29
	CE75+E25	148,20d	-	13,34 b	17,08
	CE50+BC50	125,96b	-	14,34 c	17,21
	CE75+BC25	124,45b	-	12,02 a	16,92
	CV (%)	1,49	-	0,10	-
<i>Pellets</i>	CE	654,10 C	4,92	8,83 B	17,72
	BC	574,74 A	5,05	9,85 C	18,30
	CE50+E50	690,09 E	4,10	8,12 A	18,50
	CE75+E25	669,47 D	4,51	8,05 A	18,51
	CE50+BC50	653,51 C	5,18	8,96 B	18,09
	CE75+BC25	669,04 D	5,37	8,22 A	18,02
	PC	615,65 B	-	8,13 A	19,72
CV (%)	0,64	-	3,22	-	

CE: capim-elefante -100%; BC: bagaço de cana-de-açúcar - 100%; CE50+E50: capim-elefante - 50% + eucalipto - 50%; CE75+E25: capim-elefante - 75% + eucalipto -25%; CE50+BC50: capim-elefante - 50% + bagaço de cana-de-açúcar - 50%; CE75+BC25: capim-elefante - 75% + bagaço de cana-de-açúcar - 25%; PC: *pellet* comercial; TC: taxa de compactação; Ubs: umidade na base seca; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas de uma mesma letra minúscula (para as biomassas) e maiúscula (para os *pellets*), em uma mesma coluna, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Fonte: O autor.

Para as biomassas, a composição com 50% de capim-elefante e 50% de madeira de eucalipto apresentou a maior densidade a granel e, conseqüentemente, o mesmo padrão foi observado para os *pellets* produzidos com essa composição, com

aumento de 4,1 vezes nessa propriedade. Esse resultado foi considerado desejável para produção energética, uma vez que, quanto maior a densidade a granel dos *pellets*, mais elevada é sua densidade energética e maior será a massa transportada ou armazenada num *container* ou silo de volume fixo. Desta forma, a densificação da biomassa reduz os custos de transporte, manuseio e armazenamento.

Vale ressaltar ainda que os *pellets* produzidos com diferentes composições de biomassa obtiveram densidade a granel superior ao comercial, com exceção dos *pellets* de 100% bagaço de cana-de-açúcar. Isso pode ser explicado pelas variáveis do processo de peletização, como alta umidade e granulometria do bagaço de cana-de-açúcar, o que pode ter dificultado a aglutinação das partículas. Vale ressaltar que visualmente, durante a manipulação, observou-se que estes *pellets* foram mais friáveis que os demais.

Garcia (2010) relatou que a densidade a granel do material é relevante para quantificar volumes de produtos com formas variáveis, pois fornece informações que serão úteis para a logística e transporte desses produtos, por considerar espaços vazios entre as partículas e fornecer dados reais para o transporte, além de ser utilizada para o cálculo de densidade energética.

As médias de densidade a granel estão de acordo com a literatura, que relata valores variando de 435 a 730 kg m⁻³ para *pellets* de diferentes materiais lignocelulósicos (FARIAS et al., 2015; GARCIA, 2010; PEREIRA, 2014; PROTÁSIO et al., 2015; SPANHOL, et al., 2015). Ademais, todos os *pellets* produzidos, com exceção dos *pellets* de 100% bagaço de cana-de-açúcar (BC), atenderam à norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012a), que estabelece um valor mínimo de densidade a granel de 600 kg m⁻³.

Com base na densidade a granel é possível realizar o cálculo da taxa de compactação de um determinado material em relação a outro. Destaca-se o aumento médio de massa por unidade de volume de 4,10 a 5,37 vezes em relação as partículas não compactadas, para as composições de CE50+E50 e CE75+BC25, respectivamente. Isso denota a vantagem dos *pellets* como combustível compacto, que é a maior quantidade de energia por unidade de volume. Além disso, reduz-se o espaço requerido para a estocagem e transporte desses combustíveis na mesma proporção da taxa de compactação.

Observou-se uma relação inversamente proporcional entre a densidade a granel e a taxa de compactação dos *pellets*. De acordo com Pereira (2014), isso se

deve às variáveis do processo de peletização serem similares para todas as composições, uma vez que biomassas com maiores densidades necessitam de maiores pressões, porque quanto maior a densidade a granel, maior é a resistência à densificação.

A maior umidade média foi observada na composição com 100% bagaço de cana-de-açúcar, tanto para a biomassa quanto para os *pellets*. Vale ressaltar que, apesar do bagaço de cana-de-açúcar ter sido peletizado com a umidade de 16%, estabelecido nos pré-testes, talvez esta não seja a umidade ideal para a matéria-prima em questão e o equipamento utilizado. Acredita-se que com a utilização de outro equipamento ou um ajuste fino, os resultados destes *pellets* seriam mais satisfatórios.

Os *pellets* produzidos com madeira de eucalipto e os com CE75+BC25 apresentaram os menores valores para esta propriedade, diferindo estatisticamente dos demais.

O processo de compactação reduziu a umidade do combustível em 32 (CE75+BC25) a 41% (CE), por causa do aumento na temperatura proporcionado pelo atrito entre a matriz da peletizadora e a biomassa, favorecendo a liberação da água, na forma de vapor. As médias absolutas de umidade dos *pellets* produzidos neste trabalho foram semelhantes a do *pellet* comercial, variando de -0,08 (CE75+E25) a 1,72 (BC) pontos percentuais em relação a este.

A norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012a) estabelece que os *pellets* do tipo A, produzidos com biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas, apresentem valores inferiores a 13,6%, para a umidade na base seca. Portanto, todos os *pellets* avaliados atenderam à referida norma e, considerando apenas esse requisito, poderiam ser comercializados nos países da União Europeia.

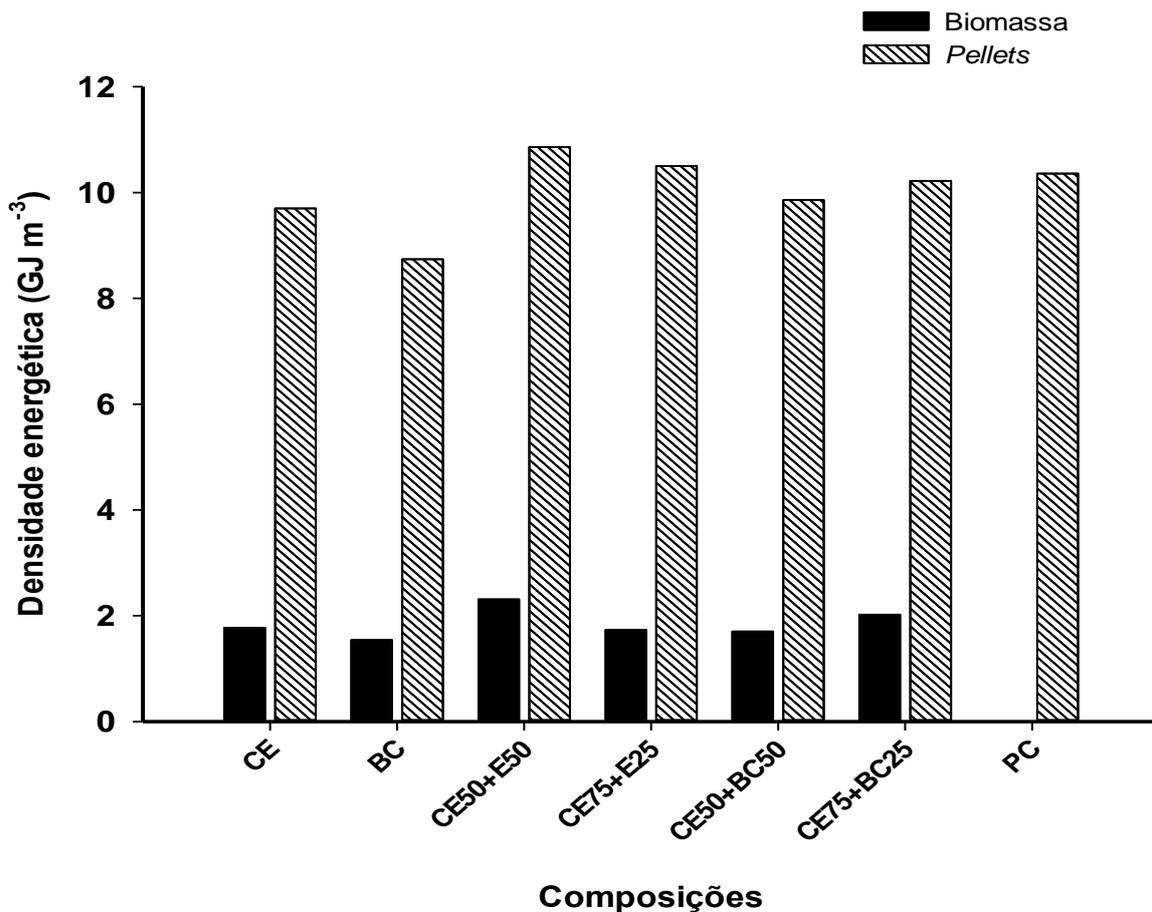
A umidade é um índice primordial quando se avaliam materiais lignocelulósicos como fonte de bioenergia, pois, quanto maior a quantidade de água presente no combustível, menor será o seu valor calórico, ou seja, para a biomassa energética quanto menor o teor de umidade, maior é a energia útil liberada na combustão (FARIAS et al., 2016). Somado a isso, a combustão de *pellets* com menor umidade (5 a 10%) é mais eficiente que em madeira com umidade de 30 a 60% (CARVALHO, 2011).

O processo de peletização resultou em aumento do poder calorífico superior das biomassas, com ganhos de até $1,21 \text{ MJ kg}^{-1}$ para a composição com 50% de capim-elefante e 50% de madeira de eucalipto.

De modo geral, os menores valores de poder calorífico superior foram encontrados nas biomassas e *pellets* com maior percentual de cinzas, ou seja, os que possuem maior quantidade de capim-elefante em sua composição. Essa relação inversamente proporcional também foi observada por Brand (2010), que relata, que a maior porção de materiais inorgânicos presentes na biomassa não mantêm a energia para o processo de combustão, tendo assim, menor potencial energético (BRAND, 2010).

Na Figura 1 encontra-se um gráfico comparativo da densidade energética das biomassas e dos *pellets*, conforme as diferentes composições.

Figura 1 – Médias de densidade energética das biomassas e dos *pellets*



CE: capim-elefante -100%; BC: bagaço de cana-de-açúcar - 100%; CE50+E50: capim-elefante - 50% + eucalipto - 50%; CE75+E25: capim-elefante - 75% + eucalipto -25%; CE50+BC50: capim-elefante - 50% + bagaço de cana-de-açúcar - 50%; CE75+BC25: capim-elefante - 75% + bagaço de cana-de-açúcar - 25% e PC: *pellet* comercial.

Fonte: O autor.

A peletização aumentou significativamente a densidade energética das biomassas, sendo observados aumentos de 4,7 vezes (CE50+E50) a 6,0 vezes (CE75+E25).

Dentre os *pellets*, as composições com capim-elefante e eucalipto (CE50+E50 e CE75+E25) obtiveram as maiores médias absolutas para a densidade energética do granel, resultado que pode ser atribuído, principalmente, ao alto teor de lignina, elevado poder calorífico e baixo teor de cinzas da madeira de eucalipto utilizado nesta composição, quando comparado as demais.

Todavia, os *pellets* de 100% capim-elefante e 100% bagaço de cana-de-açúcar apresentaram as menores médias absolutas para esta propriedade, devido à baixa densidade a granel.

A densidade energética representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de determinado volume de combustível (PROTÁSIO et al., 2015), ou seja, os *pellets* com maior densidade energética liberam maior quantidade de energia por unidade volumétrica durante a sua queima, além de viabilizar o transporte dos mesmos a longas distâncias.

Na Tabela 5 encontram-se os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets*.

Tabela 5 – Médias de finos, durabilidade mecânica, compressão diametral, diâmetro, comprimento e densidade unitária dos *pellets*

Propriedade	CE	BC	CE50+E50	CE75+E25	CE50+BC50	CE75+BC25	PC	CV (%)
Finos (%)	0,02A	0,03A	0,01A	0,01A	0,02A	0,02A	0,03A	95,47
Durabilidade (%)	96,58B	92,22A	98,66D	98,25D	96,18B	97,50C	92,55A	0,54
Compressão diametral (MPa)	5,96E	3,09B	5,16D	5,48D	4,30C	4,32C	0,52A	20,43
Diâmetro (mm)	6,19E	6,17D	6,14B	6,11A	6,13B	6,15C	6,40F	1,02
Comprimento (mm)	17,07D	12,87A	17,85E	15,53C	15,01B	15,00B	21,05F	9,27
Densidade unitária (kg m⁻³)	1.221B	1.126C	1.265A	1.243A	1.105C	1.211B	1.122C	9,75

CE: capim-elefante -100%; BC: bagaço de cana-de-açúcar - 100%; CE50+E50: capim-elefante - 50% + eucalipto - 50%; CE75+E25: capim-elefante - 75% + eucalipto -25%; CE50+BC50: capim-elefante - 50% + bagaço de cana-de-açúcar - 50%; CE75+BC25: capim-elefante - 75% + bagaço de cana-de-açúcar - 25%; PC: *pellet* comercial; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por uma mesma letra, em uma mesma linha, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

A porcentagem de finos está diretamente relacionada com a durabilidade dos biocombustíveis sólidos; observa-se que não houve diferença significativa entre as médias dos *pellets* avaliados. Conforme a norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut

Für Normung, 2012a), todos os *pellets* foram classificados como do tipo A, porque apresentaram médias iguais ou inferiores a 2% de finos.

Maiores porcentagens de finos podem afetar a densidade do material, o transporte e podem até causar explosões durante a locomoção desses combustíveis sólido, uma vez que, podem gerar poeira nos porões dos navios cargueiros (GARCIA, 2010).

As menores médias de durabilidade mecânica foram obtidas pelos *pellets* produzidos com 100% bagaço de cana-de-açúcar (BC) e pelo comercial (PC). Apenas esses *pellets* não atenderam ao requisito mínimo da norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012a), que exige como classificação, para *pellets* do tipo B, valores de durabilidade mecânica iguais ou superiores a 96%.

Ainda para a durabilidade mecânica, os *pellets* produzidos com madeira de eucalipto em sua composição foram classificados como *pellets* do tipo A (valores maiores ou iguais a 97,5%), ao passo que os demais foram classificados como tipo B.

Pellets com baixa durabilidade tendem a se desintegrar com maior facilidade durante o transporte e armazenamento, apresentando assim, maiores porcentagens de finos, o que na maioria das vezes acarreta problemas na gestão e uso desses combustíveis, inviabilizando a comercialização dos mesmos (FARIAS et al., 2016).

A compressão diametral variou entre 0,52 a 5,96 MPa, respectivamente para os *pellets* comerciais e aqueles com 100% capim-elefante. Os *pellets* produzidos com 100% de bagaço de cana-de-açúcar também tiveram baixa compressão diametral, o que pode ser explicado pela alta umidade e o tamanho das partículas desse material, o que pode ter dificultado a aglutinação das partículas durante o processo de peletização.

As dimensões dos *pellets* são variáveis controladas no processo de produção, principalmente pela peletizadora e pelo modo em que a produção é conduzida. Os *pellets* apresentaram dimensões padronizadas, com maior variação média igual a 0,08 mm. Isso ocorreu porque a peletizadora utilizada continha em sua estrutura uma matriz perfurada de 6 mm de diâmetro. Mesmo o *pellet* comercial não diferiu muito em diâmetro, em que acredita-se que tenha sido produzido com matriz semelhante.

O comprimento dos *pellets* foi estabelecido por facas instaladas abaixo da matriz, de modo que o comprimento não ultrapasse um máximo definido pelo ajuste das facas. O comprimento médio dos *pellets* variou de 12,87 a 17,85 mm e pode estar relacionado com o tempo de permanência do material na matriz perfurada durante a

peletização e com o sistema de alimentação da peletizadora. Espera-se que a variação do comprimento dos *pellets* seja menor em um processo industrial, quando a alimentação da peletizadora for mantida constante.

O diâmetro e comprimento dos *pellets* produzidos e do comercial atenderam às exigências estabelecidas pela norma DIN EN 14961-6 (Deutsches Institut Für Normung, 2012a), classificando-se como *pellets* do tipo A, apresentando diâmetro dentro da faixa de 6 ± 1 mm e comprimento de 3,15 a 40 mm.

A densidade aparente unitária variou de 1.105 (CE50+BC50) a 1.265 kg m⁻³ (CE50+E50), sendo que os *pellets* com 25 e 50% de madeira de eucalipto em sua composição diferiram estatisticamente dos demais *pellets* produzidos. Os *pellets* comerciais (PC), 100% bagaço de cana-de-açúcar (BC) e os produzidos com 50% de capim-elefante+50% bagaço de cana-de-açúcar (CE50+BC50) obtiveram a menor média para esta propriedade.

Altas densidades unitárias são desejáveis para os *pellets*, uma vez que pode colaborar para a viabilização econômica da utilização dos mesmos no País, na medida em que torna possível o transporte a maiores distâncias e otimiza o espaço em locais de armazenamento, quando comparado a outros combustíveis tradicionais produzidos com madeira, reduzindo assim os gastos (FARIAS et al., 2016).

Torres et al. (2016) encontraram densidade básica da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, com cerca de quatro anos de idade, de 470 kg m⁻³. Desta forma, todos os *pellets* produzidos neste trabalho apresentaram densidade unitária superior a madeira de eucalipto relatada na literatura.

Vale ressaltar que o gênero *Eucalyptus* é muito utilizado no Brasil para fins energéticos, em virtude das propriedades físicas e químicas de suas espécies, desejáveis a este uso, além do rápido crescimento e adaptação ao clima e solo brasileiros.

Para o transporte de *pellets* no Brasil, geralmente são empregados caminhões bitrem, com capacidade para 40 m³ (GARCIA et al., 2013). Considerando esta informação e a quantidade de energia possível de ser liberada após a combustão de cada biomassa, foi possível calcular a quantidade de energia transportada e o número de viagens a serem realizadas para transportar a mesma quantidade de energia quando comparamos outros tipos de biomassa com os *pellets* do presente estudo (Tabela 6).

Tabela 6 – Comparativo da densidade a granel, massa transportada, poder calorífico útil, energia transportada e quantidade de viagens dos *pellets* produzidos com outras biomassas

Biomassa	Densidade a granel (kg m ⁻³)	Massa transportada em 40 m ³ [kg]	PCU Kcal/kg	Energia transportada (Gcal)	Quantidade de viagens
CE	654,10	26.164	3.906	102,19	1,0
BC	574,74	22.990	4.044	92,97	1,09
CE50+E50	690,09	27.604	4.110	113,45	1,0
CE75+E25	669,47	26.779	4.094	109,63	1,03
CE50+BC50	653,51	26.140	3.978	103,98	1,05
CE75+BC25	669,04	26.762	3.995	106,91	1,00
PC	615,65	24.626	4.384	107,96	1,00
¹ Serragem de pinus	230	9.200	4.121	37,91	3,00
¹ Serragem de eucalipto	224	8.960	4.088	36,62	3,00

CE: *pellets* de capim-elefante -100%; BC: *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar - 100%; CE50+E50: *pellets* de capim-elefante - 50% + eucalipto - 50%; CE75+E25: *pellets* de capim-elefante - 75% + eucalipto -25%; CE50+BC50: *pellets* de capim-elefante -50% + bagaço de cana-de-açúcar - 50%; CE75+BC25: *pellets* de capim-elefante - 75% + bagaço de cana-de-açúcar - 25% e PC: *pellet* comercial.
¹Fonte: Adaptado de Garcia (2013).

Quanto menor a densidade a granel da biomassa, maior será a quantidade de viagens a serem realizadas. Observa-se que, para o transporte de serragem de pinus e eucalipto, seria necessário realizar até três vezes mais viagens para transportar a mesma quantidade de energia comparado aos *pellets*.

Da mesma forma, para a armazenagem, seria necessária uma área três vezes maior para a serragem de pinus e eucalipto, o que é um ponto negativo desses combustíveis, pois os gastos com transporte e armazenagem seriam maiores, quando comparados com os *pellets*.

A quantidade de energia gerada por esses biocombustíveis, é um dos pontos mais importantes na hora da compra desses materiais, pois o que interessa ao consumidor é a quantidade de energia que o combustível pode gerar, durante o processo de combustão e não o seu volume (GARCIA et al., 2013).

De acordo com Brand (2010), a densificação de resíduos implica na concentração de energia, transformando materiais com baixa densidade energética em materiais densos e com elevada quantidade de energia em um menor volume, contribuindo para a eficiência do transporte e do uso desses materiais residuais como fonte energética.

6 CONCLUSÕES

- ✓ O capim-elefante, a madeira de eucalipto e o bagaço de cana-de-açúcar possuem potencial para serem utilizados como biomassa para a produção de *pellets* para fins energéticos.
- ✓ De forma geral, os *pellets* produzidos com duas biomassas em sua composição obtiveram melhor desempenho do que aqueles produzidos com apenas uma biomassa.
- ✓ Os *pellets* produzidos com 50% de madeira de eucalipto e 50% de capim-elefante se destacaram quanto ao poder calorífico superior, densidade a granel e energética, durabilidade mecânica e densidade unitária.
- ✓ De modo geral, o desempenho dos *pellets* produzidos foi superior ao *pellet* comercial, quanto a densidade a granel, umidade, densidade energética, durabilidade mecânica, compressão diametral e densidade unitária.
- ✓ Excetuando-se os *pellets* produzidos com 100% de bagaço de cana-de-açúcar e o comercial, os demais adequaram-se à todas as especificações da norma europeia de comercialização.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE *PELLETS* – ABIPEL. 2013. Disponível em <<http://www.abipel.com.br/media/7212/An%C3%A1lise-de-Investimentos-em-pellets.pdf>> Acesso em: 24 de maio. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP – M68. **Normas técnicas**. São Paulo. 1968.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira - Resistência à compressão paralela às fibras. Rio de Janeiro, 1997.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

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**. Lavras, MG, 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

CARVALHO, N. P. R. **Implementação do plano de controle, inspeção e ensaio na produção de *pellets* de madeira**. Viseu, Portugal, 2011. 31 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, Portugal, 2011.

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**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p. 533. 2013.

COUTO, L.; et al. Produção de Pellets de Madeira – O Caso da Bio-Energy no Espírito Santo. **Revista Biomassa & Energia**, Viçosa, Minas Gerais, v.1, n.1, p. 45-52, 2004.

COSAN. 2016. Disponível em <<http://www.cosan.com.br/>>. Acesso em: 24 de maio. 2016.

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, set./out. 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14775: Determination of ash content**. Berlim: CEN, 2009. 12 p.

_____. **DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method**. Berlim: CEN, 2010a. 10 p.

_____. **DIN EN 14918: Determination of calorific value**. Berlim: CEN, 2010b. 63 p.

_____. **DIN EN 15103: Determination of bulk density**. Berlim: CEN, 2010c. 14 p.

_____. **DIN EN 15210-1: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets.** Berlim: CEN, 2010d. 12 p.

_____. **DIN EN 14961-6: solid biofuels: fuel specifications and classes: part 6, non-woody pellets for non-industrial use.** Berlin: CEN, 2012a. 16 p.

_____. **DIN EN 16127: Determination of length and diameter of pellets.** Berlim: CEN, 2012b. 11 p.

DOSSA, D., DA SILVA, H.D., BELLOTE, A. F., RODIGHIERI, H., 2002. Produção e Rentabilidade de Eucaliptos em Empresas Florestais. **Comunicado Técnico 83.** Embrapa Florestais.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. 2015. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspxf>. Acesso em: 31 Abril. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço energético nacional 2014: ano base 2013.** Rio de Janeiro, 2014. 288 p.

FARIAS, W.S.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em *pellets* para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137 - 147, jan./mar. 2016.

FERREIRA, R. P.; PEREIRA, A. V. **Melhoramento de forrageiras.** In: BORÉM, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa, MG: UFV, 2005. p. 781-812.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil.** Guaratinguetá: UNESP, 2010. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J.C. *Pellets* de madeira - Expansão e diversificação. **Revista da Madeira**, v. 127, p. 37-39, 2011.

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

GARCIA, D.P. *Pellets*: Uma questão de competitividade e preço. **Revista da Madeira**, v. 138, p. 32-34, 2014.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de *pellets* de madeira por tga. **HOLOS**, Ano 32, Vol. 1. 2016.

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.

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

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

HUBER, G. W.; DALE, B. E. Gasolina de capim e outros vegetais. **Scientific American Brasil**. 2009. p. 24-31.

KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 48, n. 1, p. 37-49, 2014.

LIMA, R. S. N. **Estimativa da diversidade genética entre clones de capim-elefante (*P. purpureum* Schum) baseada em marcadores de DNA (RAPD e ISSR)**. Rio de Janeiro: UENF, 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MANDARIM, E. **Capim-elefante: de alimentação bovina à geração de energia**. 2013. Disponível em: <<http://www.faperj.br/?id=2042.2.2>>. Acesso em: 29 Abr. 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO– MAPA. 2011. Disponível em: www.agricultura.gov.br. Acesso em: 24 de maio. 2016.

MARAFON, A. **Pesquisa investe em capim como fonte de energia**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2422024/pesquisa-investe-em-capim-como-fonte-de-energia>. Acesso em: 27 Abr. 2016.

MAZZARELLA, V. **Capim-elefante: a energia renovável moderna**. 2013. Disponível em: <<http://www.capimelefante.org>>. Acesso em: 20 Abr. 2015.

MCKENNEY, D. W.; WEERSINK, A.; ALLEN, D.; YEMSHANOV, D.; BOYLAND, M. Enhancing the adoption of short rotation woody crops for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 64, p. 363-366, 2014.

MELLO, A. C. L.; TABOSA, J. N.; FARIAS, I. Características produtivas e qualitativas de clones de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) avaliados sob pastejo na Zona da Mata de Pernambuco. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 26, n. 2, p. 251-257, 2004.

MORAIS, R. F. **Potencial produtivo e eficiência da fixação biológica de nitrogênio de cinco genótipos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.), para uso como fonte alternativa de energia**. Seropédica, RJ :UFRRJ, 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2008.

NAKANISHI, E. Y. **Cinza residual da queima de biomassa de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) como material pozolânico substituto do cimento Portland.** São Paulo, SP: FZEA-USP, 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimento da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2013.

NOVA CANA. 2016. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/>. Acesso em: 28 de maio. 2016.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets.** London: Earthscan, 2010. 593 p.

OLIVEIRA, C. M. Madeira: o combustível do futuro?. **Revista da Indústria de Biomassa e Energia.** Ano II, n. 8, p. 23-31, abr. 2015.

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>. Acesso em: 15 Abr. 2015.

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).

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

PROTÁSIO, T.P. et al. Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira,** Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, out./dez. 2015.

QUESADA, D. M.; et al. **Relação C:N e análise de fibras em genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) estudados para produção de energia renovável.** FERTBIO, julho 2004, Lajes, Santa Catarina.

RASGA, R. O. S. **Pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo BPF-A1 em pequenos e médios consumidores no Estado de São Paulo.** São Paulo, SP: EESP, 2013. 165 p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia)- Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP. 2013.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; ZÁRATE, H. Centrais térmicas por gasificação. In: RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. (Eds.). **Combustão e gaseificação de biomassa sólida.** Brasília, 2008. p.88-105.

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

ROOS, J. A.; BRACKLEY, A. M. **The Asian Wood Pellet Markets**. Gen Tech Rep. PNW-GTR-861. Portland, OR. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 25 p. 2012.

SANDER, R. **Viabilidade de implantação de unidade produtora de *pellets* no Extremo Sul da Bahia**. Curitiba: UFPR, 2011. 38 p. Dissertação (Mestrado em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2011.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood *pellets* from different species. **Biomass and Bioenergy, Oxford**, v. 35, n. 7, p. 2634-2639, 2011.

TUFFI SANTOS, L. D. et al. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 23, n. 1, p. 133-142, 2005.

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

SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

SOMMERVILLE, C.; YOUNGS, H.; TAYLOR, C. et al. **Feedstocks for lignocellulosic biofuels**. **Science**, v. 329, p.790-792, 2010.

SPANHOL, A.; NONES, D.L.; KUMABE, F.J.B.; BRAND, M.A. Qualidade dos *pellets* de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, Curitiba, PR, 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**, v. 35, p. 4849-4854, 2011.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI Test Methods**, Atlanta: Tappi Press, 1998.

TORRES, P. M. A. et al. Caracterização Físico-Mecânica da Madeira Jovem de *Eucalyptus camaldulensis* para Aplicação na Arquitetura Rural. **Floresta e Ambiente**. V. 23, n.1, p. 109-117. 2016.

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

VILELA, H.; CERIZE, D. **Capim-elefante paraíso na geração de energia**. 2010. Disponível em: <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_capim_elefante_paraíso_producao_energia.html>. Acesso em: 25 abr. 2015.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da Madeira para Fins Energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **BIOENERGIA E BIORREFINARIA: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. 1. ed. Viçosa, MG: Os Autores, 2013. cap. 12, p. 321-354.

WARAJANONT, S.; SOPONPONGPIPAT, N. Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**. n. 2, p. 74- 79, 2013. Disponível em: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648>. Acesso em: 15 Maio. 2016.