



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

BÁRBARA MENDES OLIVEIRA

**QUALIDADE DE *PELLETS* DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SERRAGEM
DE EUCALIPTO EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2016

BÁRBARA MENDES OLIVEIRA

**QUALIDADE DE *PELLETS* DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SERRAGEM
DE EUCALIPTO EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES**

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: Prof^a. Dr^a. Marina Donária Chaves Arantes.
Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Coorientador: Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto.

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2016

O48q Oliveira, Bárbara Mendes, 1991-
Qualidade de pellets de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições / Bárbara Oliveira Mendes. – 2016.

52 f. : il.

Orientadora: Marina Donária Chaves Arantes.

Coorientadores: Fabricio Gomes Gonçalves, Humberto Fantuzzi Neto.

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

1. Biomassa. 2. Peletização. 3. Energia renovável. 4. Biocombustível. I. Arantes, Marina Donária. II. Gonçalves, Fabricio Gomes. III. Fantuzzi Neto, Humberto. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

**QUALIDADE DE PELLETS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SERRAGEM
DE EUCALIPTO EM DIFERENTES COMPOSIÇÕES**

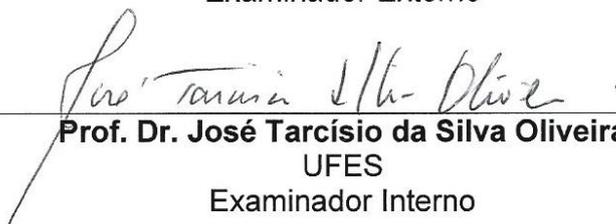
Bárbara Mendes Oliveira

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 16 de dezembro de 2016.



Prof. Dr. Yonny Martnez López
UFES
Examinador Externo



Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira
UFES
Examinador Interno



Profª. Drª. Marina Donária Chaves Arantes
UFES
Orientadora

DEDICATÓRIA

Ao meu amado Vô Davino, que mesmo lá do céu, sei que de alguma forma sempre se fez presente, cuidando, olhando, guiando meus passos e auxiliando-me em minha jornada. Posso sentir sua presença em minhas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar junto à mim em todos os momentos da minha vida, me abençoando e protegendo. Força maior e luz que me guia.

Aos meus pais, Gicelle e Neusmar, pelo apoio e amor incondicional e por não medirem esforços para a concretização dessa conquista.

À minha irmã Bruna, mais que uma irmã é uma amiga e companheira. Obrigada pela força, e por todos os conselhos... Obrigada minha irmã por existir.

À minha doce Vó Cema, pelo exemplo de vida, apoio e carinho.

Ao amor da minha vida Fábio, obrigada pelo companheirismo, dedicação, incentivo, paciência, amor e carinho. Obrigada por me ensinar a ser forte e mesmo distante esteve sempre presente me apoiando.

À Eng-Maq[®] e em especial ao Otávio, pelo treinamento realizado com a peletizadora, pela doação do material e disponibilidade para realização da peletização, pelas valiosas contribuições técnicas e todas as informações repassadas sempre com muita solicitude. Pela sua grande generosidade muito obrigada.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À FIBRIA, pela concessão de bolsa de estudos.

À Professora Marina Donária Chaves Arantes pela paciência, amizade, orientação, ensinamentos repassados e por ter sido presente em todas as etapas deste trabalho.

Aos Professores coorientadores Fabricio Gomes Gonçalves e Humberto Fantuzzi Neto pelas contribuições ao longo dessa pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e demais professores do Programa pela amizade e ensinamentos.

Aos Técnicos de laboratório, Damielle, Gilson, Luciano, José Geraldo e ao marceneiro Elecy por terem auxiliado na realização das análises e dado suporte no andamento da pesquisa.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e a UFV, por abrirem as portas do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira para realização de algumas análises. E ao Lawrence e a Fernanda pela receptividade e auxílio na realização das análises.

Aos colegas de curso e de trabalho, em especial Jaily e Cileide, pelo convívio, amizade e ajuda na execução deste trabalho, vocês foram muito importantes para esta conquista.

À Thaís Mendes Brito, uma grande amiga que fiz durante essa caminhada, obrigada por tudo; pelas conversas e conselhos e pela ajuda na realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram e me apoiaram para iniciar, desenvolver e terminar com sucesso este trabalho.

RESUMO

OLIVEIRA, Bárbara Mendes. **Qualidade de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marina Donária Chaves Arantes, Coorientadores: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves, Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto.

O uso da biomassa agroflorestal na forma de *pellets* para fins energéticos além de ser uma alternativa para produção de energias limpas é uma opção de destinação de resíduos lignocelulósicos. Neste trabalho avaliou-se a qualidade de *pellets* produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições. Para cada composição, originária dos *pellets*, foram determinados os teores de extrativos totais, lignina total, umidade, densidade a granel, cinzas, poder calorífico inferior e densidade energética. Nos *pellets*, em diferentes proporções, foram realizadas as análises de umidade, densidade a granel, taxa de compactação, teor de cinzas, poder calorífico inferior, teor de materiais voláteis, carbono fixo, densidade energética, temperatura de combustão e as características físicas e mecânicas (diâmetro, comprimento, densidade unitária, resistência à compressão diametral, teor de finos e durabilidade mecânica). O bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de eucalipto individualmente e de forma composta apresentaram características desejáveis para utilização energética por meio do processo de peletização. Os resultados foram satisfatórios para quase todas as propriedades estudadas, exceto densidade a granel e durabilidade mecânica para os *pellets* entre 100% e 70% bagaço de cana-de-açúcar em suas constituições.

Palavras-chave: Biomassa, peletização, energia renovável, biocombustível

ABSTRACT

OLIVEIRA, Barbara Mendes. **Quality of sugarcane bagasse and eucalyptus sawdust pellets in different compositions**. 2016. Dissertation (Master's degree in Forest Science) - Federal University of Espirito Santo, Jerônimo Monteiro - ES. Advisor: Prof^a. Dr^a. Marina Donária Chaves Arantes, Co-Advisors: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves, Prof. Dr. Humberto Fantuzzi Neto.

The use of agroforestry biomass in pellets form for energy purposes, besides being an alternative for production of clean energy, is an option for the disposal of lignocellulosic residues. This work evaluated the quality of pellets produced with sugarcane bagasse and eucalyptus sawdust in different compositions. For each composition, originating from the pellets, the total extractives contents, total lignin, moisture, bulk density, ash, lower calorific value and energy density were determined. In the pellets, in different proportions, were realized the analyzes of moisture, bulk density, compaction rate, ash content, lower calorific value, volatile material content, fixed carbon, energy density, combustion temperature and physical and mechanical characteristics (diameter, length, unit density, diametric compression strength, fines content and mechanical durability). Sugarcane bagasse and eucalyptus sawdust individually and in composite form presented desirable characteristics for energy use through of the pelletizing process. The results were satisfactory for almost all the properties studied, except bulk density and mechanical durability for the pellets between 100% and 70% sugarcane bagasse in their constitutions.

Keywords: Biomass, pelletizing, renewable energy, biofuel

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.1.1 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 RESÍDUOS DE BIOMASSA VEGETAL PARA UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA... 13	
3.1.1 O setor florestal e a produção de resíduos	13
3.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar	14
3.2 A INDÚSTRIA E O MERCADO DE <i>PELLETS</i> NO BRASIL..... 17	
3.2.1 O processo de peletização da biomassa	19
3.2.2 Qualidade dos <i>pellets</i> e suas vantagens	21
4 MATERIAL E MÉTODOS..... 24	
4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS..... 24	
4.2 PRODUÇÃO E ANÁLISES DOS <i>PELLETS</i>	26
4.2.1 Produção dos <i>pellets</i> 26	
4.2.2 Avaliação das propriedades dos <i>pellets</i> 27	
4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E DOS <i>PELLETS</i> 29	
5.2 PROPRIEDADES DOS <i>PELLETS</i>	38
6 CONCLUSÕES..... 43	
7 RECOMENDAÇÕES	44
REFERÊNCIAS..... 45	
APÊNDICES	52

1 INTRODUÇÃO

Em função do modelo energético atual vigente no mundo, fundamentado na utilização de combustíveis fósseis, os quais são limitados e não renováveis e ainda, do impacto ambiental gerado durante sua exploração, o investimento em energias limpas têm-se intensificado de maneira global como forma de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa.

Entre as fontes de energia renovável existentes, a biomassa representa àquela originada a partir de matéria orgânica, para a geração de energia térmica. Atualmente, muitos países utilizam-se deste tipo de combustível e das tecnologias consolidadas para a sua queima, gerando calor para aquecimento industrial e, ou, energia elétrica, entre outras aplicações.

Dentre as matérias-primas oriundas da biomassa estão os resíduos lignocelulósicos. No Brasil, entre os mais abundantes estão o bagaço de cana-de-açúcar, gerado nas usinas sucroalcooleiras durante o processo produtivo do açúcar ou do álcool; e aqueles decorrentes do processamento mecânico da madeira de eucalipto, produzidos pelas indústrias madeireiras, ambos com potencial para produção de bioenergia.

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (2016), o País é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção total estimada pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2016), para a safra 2016/2017 de 684,77 milhões de toneladas em uma área aproximada de 8.973,2 mil hectares, sendo uma ampla fonte de biomassa e importante matéria-prima, principalmente para produção de açúcar e biocombustível (ALMEIDA, 2015).

Quanto à produção de resíduos pelo setor canavieiro, Dias et al. (2012) estimaram que, para cada tonelada de cana-de-açúcar triturada, são produzidos 270 kg de bagaço. Dessa forma, com base nos dados oficiais expostos pela CONAB (2016), pode-se calcular a disponibilidade brasileira atual desse resíduo em, aproximadamente 184,9 milhões de toneladas, e mesmo com a utilização deste resíduo como combustível pelas indústrias, ainda existe grande quantidade de excedente.

Em relação ao setor florestal, segundo o último Relatório da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2016), em 2015, foram gerados cerca de 46,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos, destes 33,0 milhões de toneladas (70,5%) foram gerados pelas atividades florestais e 13,8 milhões de toneladas (29,5%) pelas

atividades industriais. Entre as atividades industriais, a indústria de madeira serrada destaca-se como a maior geradora de resíduos, os quais, segundo Dias et al. (2012), em sua grande maioria, são deixados nos pátios das indústrias, estando sujeitos a decomposição natural, sem aproveitamento da energia neles contido e gerando passivos ambientais importantes.

A transformação desses dois resíduos lignocelulósicos em *pellets*, forma mais eficiente de utilização da biomassa, por meio da sua densificação é, portanto, uma alternativa para produção de energia limpa, pois menos poluentes são gerados em relação aos combustíveis não renováveis, minimizando desta forma os impactos ambientais. Ainda, proporcionam alta eficiência energética com menor custo, se comparado com a matéria-prima original (CARASCHI et al., 2013; TAVARES; TAVARES, 2015).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, por meio da Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), obriga, tanto as indústrias, como os produtores rurais a dar um destino adequado aos resíduos gerados pelo processamento das matérias-primas provenientes das suas atividades. Como não é mais permitido o descarte dos resíduos antes de esgotar-se todas as possibilidades de recuperação dos mesmos, essa legislação incentiva indiretamente, o melhor aproveitamento dos resíduos, por exemplo, na forma de *pellets* para fins energéticos.

Os *pellets* podem ser produzidos a partir de composições de diferentes biomassas, e essas interferem na sua qualidade. Apesar do processo de produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de *Eucalyptus* spp. já serem realizados no Brasil existem poucos estudos em relação ao processo de peletização desses dois tipos de biomassa de forma composta. Pesquisas nessa área poderão contribuir para a produção de *pellets* de qualidade com competitividade de mercado em relação aos demais biocombustíveis existentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade de *pellets* produzidos com bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições.

2.1.1 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduos bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto;
- Determinar a proporção ideal entre os resíduos para a produção de *pellets* com melhores características energéticas;
- Analisar a influência das composições entre as biomassas nas propriedades dos *pellets*;
- Verificar se os *pellets* produzidos estão dentro dos padrões de comercialização estabelecidos para o produto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS DE BIOMASSA VEGETAL PARA UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA

3.1.1 O setor florestal e a produção de resíduos

O setor florestal brasileiro destaca-se, principalmente, pelo cultivo de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. No Brasil, os plantios de florestas começaram há mais de um século. Em 1904, o pioneiro Navarro de Andrade trouxe sementes de eucalipto para produção de mudas visando o plantio para produção de madeira para diversos usos, desde a lenha como combustível para locomotivas até como mourões para cercas margeando as ferrovias da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Posteriormente, em 1947, o *Pinus* foi introduzido no Brasil, sendo plantado em escala comercial (MORA; GARCIA, 2000; SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF, 2015).

De acordo com Mora e Garcia (2000), a expansão da eucaliptocultura ao longo dos anos ocorreu, principalmente, pelas suas características de adaptabilidade às condições ambientais, características silviculturais, alta produtividade, rápido crescimento volumétrico, adequação aos mais diferentes usos industriais, com ampla aceitação no mercado, aliados aos avanços em pesquisas na área de melhoramento.

Em números atuais, as florestas plantadas ocupam uma área de 7,8 milhões de hectares, correspondendo a 0,9% do território nacional, sendo o setor responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais. O gênero *Eucalyptus* possui a maior área de florestas plantadas do Brasil, 5,6 milhões de hectares, equivalentes a 71,8% do total, estando localizadas, principalmente, nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul e a participação do setor no Produto Interno Bruto – PIB brasileiro tem crescido a cada ano e encerrou 2015 representando 1,2% de toda a riqueza gerada no País. O Espírito Santo ocupa a sexta posição em área plantada com eucalipto, com cerca de 227 mil hectares plantados (IBÁ, 2016).

O fato do Brasil possuir uma extensa área florestal explica o enorme potencial que o País oferece para a geração de produtos madeireiros, tendo destaque a madeira proveniente de florestas plantadas (OLIVEIRA, 2015). Ao longo da cadeia produtiva florestal diferentes tipos de resíduos são gerados, entre eles

estão os resíduos oriundos da colheita como, por exemplo, cascas, galhos e folhas, e aqueles gerados pelas indústrias madeireiras na etapa de processamento como maravalha e serragem, em diferentes granulometrias, provenientes das operações de desdobro (TEIXEIRA, 2005). Associado a isso, também há o descarte do produto após sua vida útil.

Resíduo tem por definição ser todo o remanescente gerado por um processo de exploração ou produção, de transformação ou utilização (QUIRINO, 2003). Sendo também considerado toda substância, material ou produto destinado por seu proprietário ao abandono.

Todo processo de transformação da madeira gera resíduos em menor ou maior quantidade. Em 2015 a geração de resíduos de madeira processada mecanicamente foi equivalente a mais de 50 milhões de m³ (OLIVEIRA, 2016), valor correspondente a 45% de perdas no processamento decorrentes principalmente das operações de desdobro das toras, ou seja, do processamento primário da madeira.

Segundo informações do Relatório Anual da IBÁ (2016), na indústria de base florestal, 65,9% dos resíduos são destinados à geração de energia por meio da queima em caldeiras, que geram vapor e, eventualmente, energia elétrica para o processo produtivo, eliminando a utilização de combustível fóssil. Outra alternativa para agregar valor e reduzir os impactos causados com potencial de utilização na produção de energia, seria na forma de briquetes ou *pellets*.

A biomassa proveniente da transformação de resíduos são fontes de energia renovável com maiores potenciais de desenvolvimento para os próximos anos e apresentam grandes vantagens, como aumento da sustentabilidade da matriz energética, ampliação na geração de renda, diminuição dos gases de efeito estufa e diminuição dos volumes de resíduos depositados no ambiente e redução de custos com os mesmos (QUIRINO, 2003; VIANA 2011).

3.1.2 Bagaço de cana-de-açúcar

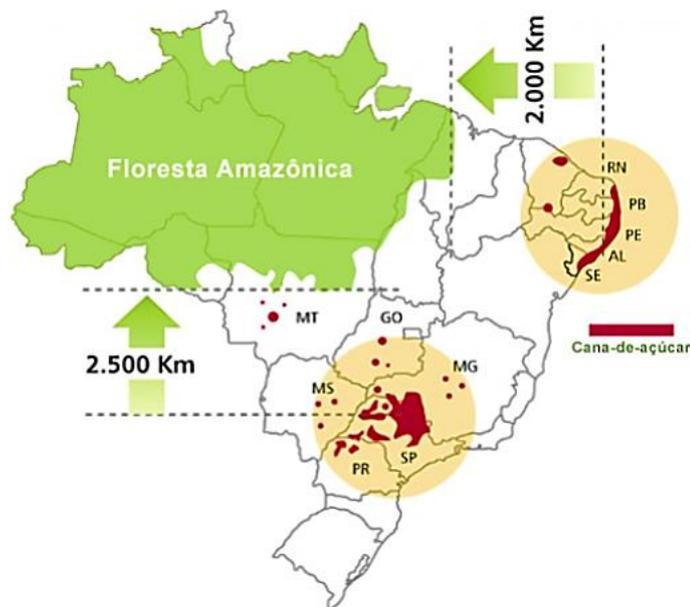
O cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) foi introduzido no Brasil durante a colonização, por causa da necessidade dos portugueses em ocupar o território de uma região sem muita importância econômica para a coroa portuguesa. O produto agrícola foi escolhido por diversos fatores, entre eles, a existência do solo adequado ao cultivo, a experiência dos portugueses no cultivo da

espécie e a ampla aceitação desse produto pelos países europeus (LOBO, 2013; RODRIGUES, 2010).

A cana-de-açúcar, no País, pode ser considerada como uma das matérias-primas mais importantes pela diversidade de seus produtos tais como: etanol, açúcar, cachaça, caldo de cana, rapadura, energia, além de seus subprodutos, entre eles o vinhoto resultante do processo de destilação do caldo de cana-de-açúcar para produção de etanol e o melaço proveniente da produção de açúcar (RODRIGUES, 2010).

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA (2016a), a produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil (Figura 1). Do total de cana-de-açúcar produzido, na safra 2014/2015, no Brasil, a Região Sudeste foi responsável por 63,9%, destacando-se como a maior região produtora, seguida pela Região Centro-Oeste com 19,9% (CONAB, 2015).

Figura 1 – Áreas de concentração das plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade



Fonte: UNICA (2016a).

No processo de industrialização da cana-de-açúcar, após a moagem, gera-se o bagaço, que pode ser considerado o principal resíduo agrícola do Brasil, representando 80 a 85% da biomassa total (VIEIRA, 2012). O bagaço de cana-de-açúcar *in natura* é uma matéria orgânica vegetal constituída por 47% celulose, 27% hemiceluloses e 26% lignina, aproximadamente (CANILHA et al., 2007). Esses três componentes correspondem a cerca de 75% da biomassa vegetal e conferem

resistência mecânica à planta. O restante da biomassa é composta por substâncias como proteínas, óleos vegetais e minerais (FONSECA, 2009).

Para Viana (2011), o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa energética oferece uma oportunidade ímpar para o Brasil aumentar ainda mais a sua competitividade em matéria de energia renovável, com grandes benefícios à sociedade brasileira, além do valor estratégico.

Esse resíduo tem aumentado por causa da expansão do cultivo da cana-de-açúcar, principalmente, para produção de álcool. E mesmo parte do bagaço de cana-de-açúcar sendo utilizado pela indústria sucroalcooleira para produção de energia, tanto na cogeração de energia elétrica como na forma de vapor, em caldeiras ou fornos, ainda existe grande quantidade excedente subutilizada (ALMEIDA, 2015).

Segundo Viana (2011), a grande utilização do bagaço de cana-de-açúcar é o seu aproveitamento como combustível para geração de energia elétrica para consumo nas usinas e para venda às concessionárias de energia elétrica. O grau de eficiência do sistema de cogeração ou geração, depende da tecnologia empregada em cada usina.

De acordo com compilações da UNICA (2016b), a geração de energia para a rede de distribuição de eletricidade brasileira, em 2015, pela biomassa da cana-de-açúcar correspondeu a 4,3% do consumo nacional de energia elétrica, o equivalente a 20,2TWh disponibilizados ao sistema interligado do Brasil, o suficiente para abastecer 10 milhões de casas por um ano. O estado de São Paulo destaca-se como o principal produtor de bioeletricidade sucroenergética.

Atualmente, as indústrias de cana-de-açúcar veem de forma promissora a utilização dos resíduos oriundos da atividade canavieira no setor de energia na forma de *pellets*, em substituição ao carvão como geradores de energia térmica. Investimentos de origem japonesa na ordem de US\$ 130 milhões foram realizados em uma das maiores processadoras de cana-de-açúcar do mundo, situada no Brasil, para produção de *pellets* com biomassa de cana-de-açúcar (NOVA CANA, 2016).

Além disso, de acordo com a fonte supracitada, espera-se que em 2025 a produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar cheguem a dois milhões de toneladas por ano. Os principais mercados alvos são Japão, Coreia do Sul e Europa, além de considerarem os Estado Unidos como um mercado potencial para exportações. As expectativas são de que o mercado global de *pellets* passe de 25

para 40 milhões de toneladas em cinco anos, impulsionado pela preocupação global em relação as mudanças climáticas.

Outra novidade do setor sucroenergético é o desenvolvimento de uma nova variedade de cana-de-açúcar, a cana-energia, desenvolvida no intuito de produzir até seis vezes mais biomassa em relação as cultivares normalmente utilizadas na produção de álcool e açúcar. O bagaço da cana-energia seria dessa forma extremamente competitivo e poderia ser utilizado para produção de energia destinada a comercialização pelo setor energético brasileiro e para produção de *pellets* com características superiores visando atender os mercados internacionais (NOVA CANA, 2016; VIANA, 2011).

3.2 A INDÚSTRIA E O MERCADO DE *PELLETS* NO BRASIL

O Brasil é um país que reúne inúmeras características favoráveis ao desenvolvimento da indústria de biomassa, principalmente aquelas dedicadas à produção de *pellets*. Entre essas características estão a grande disponibilidade de áreas para reflorestamento e cultivos agrícolas, e a alta incidência de radiação solar durante todo o ano (TAVARES; TAVARES, 2015).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2015), ano base 2014, quase 40% da energia do Brasil veio de fontes renováveis, diferentemente da matriz energética global em que, segundo Garcia e Caraschi (2012), tais fontes representam apenas 10%. A biomassa da cana-de-açúcar contribui com cerca de 15,7% dessa energia renovável, enquanto a madeira possui uma contribuição de cerca de 8,1%, ambos possuindo posições de destaque na oferta interna de energia.

Diante do cenário mundial de escassez de fontes de energia não renováveis, pressões de ambientalistas e da sociedade civil, a utilização da biomassa vegetal vem sendo fortalecida, pois possui grande potencial de geração de energia, de maneira sustentável e com preços competitivos (VIDAL; HORA, 2011).

O surgimento da produção de *pellets*, como alternativa ante as fontes não renováveis, ocorreu nos países europeus e nos Estados Unidos no final da década de 1970, durante a crise do petróleo. Já no Brasil, essa tecnologia só se desenvolveu 20 anos depois, e esteve relacionada, principalmente, à necessidade de agregar valor aos resíduos do processamento da madeira (RASGA, 2013).

Os *pellets* se desenvolveram significativamente nos últimos anos, passando de um produto pouco conhecido, no início da década de 1990, a uma mercadoria que, na atualidade, é negociada internacionalmente (OLIVEIRA, 2016).

Percebe-se que o consumo desse produto vem crescendo ao longo dos anos, o que impulsiona o crescimento do setor de peletização. Dessa forma os países desenvolvidos vêm aumentando a procura por *pellets* para suprir suas demandas energéticas em substituição aos combustíveis fósseis. A previsão de crescimento anual da demanda global de *pellets* entre 2010 e 2025 é muito animadora para as indústrias, atingindo um consumo de cerca de 52 milhões de toneladas no final desse período (FUTURE METRICS LLC, 2016).

Segundo levantamento realizado em 2014 pela Associação Brasileira das Indústrias de *Pellets* – ABIPEL (2015), o Brasil dispõe de 19 plantas industriais de *pellets*, estando concentradas nas Regiões Sul e Sudeste do País para aproveitar os subprodutos das inúmeras indústrias de base florestal destas regiões (Figura 2). A maioria delas tem capacidade instalada para produzir até 460.000 toneladas/ano. E ainda, existem diversos projetos de plantas industriais para a produção do biocombustível em diversas regiões do Brasil.

Figura 2 – Localização das indústrias de *pellets* no Brasil



Fonte: ABIPEL (2015), adaptado pela autora.

A principal aplicação dos *pellets* no mercado brasileiro é na geração de energia térmica, em indústrias e comércio, correspondendo a, aproximadamente,

99% da produção interna, sendo utilizado por pizzarias, padarias, hotéis, parques aquáticos, academias de natação, indústrias alimentícias, galvanoplastia a quente, lavanderias industriais, indústrias de pneus e indústrias de produtos plásticos. Cerca de 1% dos *pellets* produzidos são consumidos em aplicações menos convencionais, em substituição a “areia de gato” e no combate à dengue (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – ABIB, 2014).

3.2.1 O processo de peletização da biomassa

Os *pellets* são biocombustíveis sólidos produzidos a partir de diferentes matérias-primas lignocelulósicas, possuem a forma cilíndrica, de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro, compacto e alta densidade energética se comparados ao material de origem, produzidos com baixa umidade, possibilitando uma maior eficiência na combustão em contraposição aos combustíveis renováveis tradicionais, como a lenha (CARASCHI et al., 2013; FARIA et al., 2016; GARCIA, 2010).

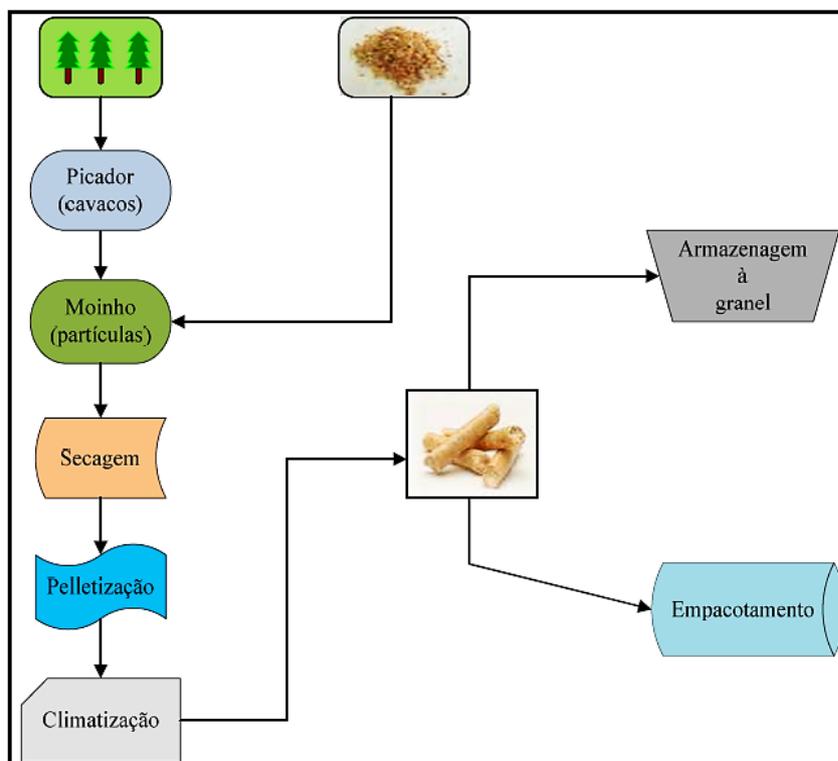
A produção de *pellets* tem influência de inúmeras variáveis. Nesse sentido, têm-se as propriedades inerentes à matéria-prima, tais como; umidade, tamanho das partículas e densidade; bem como os parâmetros operacionais, oriundos do processo, como; pressão e temperatura de compactação. Todas essas variáveis são importantes para obtenção de um produto final uniforme e padronizado, e conseqüentemente de fácil manipulação, transporte, armazenamento e utilização. Aliado a todas essas variáveis, deve-se considerar uma mão-de-obra qualificada e com especialidade técnica na produção desse biocombustível (ALMEIDA, 2015; GARCIA, 2010; HOFFELDER, 2011).

A pressão aplicada durante o processo de peletização à matéria-prima causa uma força de atrito que aquece e comprime o material através dos orifícios da matriz que possuem dimensões limitadas. Em geral, não é necessário a utilização de nenhum aditivo para a ligação entre as partículas; pois, a temperatura empregada durante o processo permite a fluidificação da lignina contida nas partículas dos resíduos, a qual age como ligante natural entre as fibras da biomassa. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado (GARCIA, 2010; GONÇALVES, 2010).

O processo de peletização, segundo Garcia (2010) e Nielsen et al. (2009) consiste nas seguintes etapas, ilustradas na Figura 3:

- 1) geração de matéria-prima: biomassa vegetal disponível, com potencial para energia;
- 2) uniformização das partículas: preferencialmente com diâmetro inferior a 5,0 mm, para obtenção de um produto de qualidade;
- 3) secagem da matéria-prima: remoção da umidade do material entre 8 e 12%;
- 4) peletização: compactação por extrusão por meio de uma peletizadora, utilizando pressão em torno de 300 MPa e temperatura máxima aproximada de 120°C, durante o processo;
- 5) resfriamento do produto: promove a estabilização da lignina após a peletização em altas temperatura, realizada antes do produto ser direcionado ao setor de embalagem;
- 6) empacotamento e armazenagem: utilizam-se embalagens do tipo sacos plásticos de 5,0 até 50,0 kg, fardos industriais de 500 a 1000 kg, ou até em caminhões tanques, a granel.

Figura 3 – Diagrama do processo produtivo de *pellets* de madeira



Fonte: GARCIA (2010, p.22).

3.2.2 Qualidade dos *pellets* e suas vantagens

De acordo com Hahn (2004), as características químicas, físicas e energéticas são importantes parâmetros para avaliação da qualidade dos *pellets*. Entre estas, as principais a serem observadas são: teor de materiais voláteis; poder calorífico; teores de enxofre, magnésio, cálcio e fósforo; teor de cinzas; umidade; densidade e dimensões do produto. No Tabela 1 pode-se verificar variações em algumas dessas características em *pellets* produzidos em diferentes pesquisas.

Tabela 1 – Variações de algumas características utilizadas como parâmetros de qualidade de *pellets*

Referências	Matérias-primas	Características			
		U (%)	CZ (%)	PCI (MJ kg ⁻¹)	DG (kg m ⁻³)
Almeida (2015)	Bagaço de cana-de-açúcar	6,84	8,70	16,90	726,32
Camargo (2013)	Resíduos de madeira de três diferentes procedências	4,95 a 12,36	0,99 a 1,11	16,39 a 17,80	645,60 a 675,00
Cubero-Abarca et al. (2014)	Polpa de café	11,40	6,74	11, 59*	600,00
Faria et al. (2016)	Resíduos do café e madeira de <i>Eucalyptus</i> spp.	9,80 a 11,53	3,39 a 9,90	17,81 a 18,31	702,70 a 755,60
Garcia, Caraschi e Ventorim (2013)	Cinco procedências de <i>pellets</i> de madeira de três estados brasileiros	6,20 a 10,25	0,33 a 2,59	16,43 a 18,13	630,10 a 647,40
Monteiro et al. (2014)	Pó de cortiça em diferentes granulometrias	7,37 a 9,04	3,84 a 4,81	17,66 a 21,03	686,57 a 705,10
Spanhol et al. (2015)	Biomassa florestal residual de <i>Pinus</i> spp. de diferentes procedências	5,91 a 8,91	0,16 a 0,52	16,93 a 17,41	637,45 a 701,55

U: umidade; CZ: cinzas; PCI: poder calorífico inferior; DG: densidade a granel; *Valor referente ao poder calorífico líquido.

Atenção especial deve ser dada às características mecânicas quando tem-se em vista o transporte dos *pellets*, principalmente em relação à exportação. A

resistência a compressão diametral, durabilidade mecânica e teor de finos são parâmetros que simulam as condições de transporte. Os *pellets* devem apresentar durabilidade deve ser suficiente para evitar a formação de finos durante o transporte ou na estocagem, mantendo a qualidade do combustível pós-transporte (GARCIA, 2010).

Em mercados onde a produção e o comércio de *pellets* estão melhores estruturados já existem normas que visam a padronização e a obtenção de um produto de qualidade. Porém, no Brasil ainda não há uma definição de normas e padrões para biocombustíveis sólidos como os *pellets*, estando ainda em fase de implantação. Normas europeias e americana, já foram consolidadas e são utilizadas como parâmetros internacionais na avaliação da qualidade de *pellets* (SPANHOL, 2015).

A norma alemã EN 14961-6 (DIN, 2012a) aborda a qualidade de *pellets* oriundos de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas. Essa norma foi utilizada para fins de comparação da qualidade dos *pellets* produzidos neste trabalho (Tabela 2).

Tabela 2 – Especificações para *pellets* de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou misturas de biomassas

Propriedades	Classificação	
	Tipo A	Tipo B
Diâmetro (mm)	6 ± 1	6 ± 1
Comprimento (mm)	$3,15 \leq \text{comprimento} \leq 40$	$3,15 \leq \text{comprimento} \leq 40$
Umidade base úmida (%)	≤ 12	≤ 15
Umidade base seca (%)	$\leq 13,6$	$\leq 17,6$
Teor de cinzas (%)	≤ 5	≤ 10
Durabilidade mecânica (%)	$\geq 97,5$	$\geq 96,0$
Finos (%)	≤ 2	≤ 3
Poder calorífico útil – PCU (MJ kg ⁻¹)	$\geq 14,1$	$\geq 13,2$
Densidade a granel (kg m ⁻³)	≥ 600	≥ 600
Nitrogênio (%)	$\leq 1,5$	$\leq 2,0$
Enxofre (%)	$\leq 0,20$	$\leq 0,20$
Cloro (%)	$< 0,20$	$< 0,30$

Fonte: EN 14961-6 (DIN, 2012a) adaptado pela autora.

Como principais características desejáveis aos *pellets*, após o processo de fabricação, que tornam sua utilização vantajosa (CARONE, PANTALEO, PELLERANO, 2011; WOLF, VIDLUND, ANDERSON, 2006;) estão:

1) aumento do poder calorífico nos *pellets* de biomassa por meio da diminuição da umidade da matéria-prima;

2) aumento da densidade causado pelo processo de trituração do material que diminui o comprimento das partículas deixando-o melhor agrupado por unidade de volume e, principalmente, pela redução do volume na fase de prensagem na matriz de peletização;

3) maior relação de energia por volume, ligado ao processo de compactação, ao aumento do poder calorífico e redução da umidade;

4) custos de transporte reduzidos, sendo um dos fatores mais importantes na viabilização da peletização de biomassa, pois com a densificação da biomassa facilita-se o transporte tornando-o mais barato;

5) menor área e custo de estocagem, pois o aumento da densidade possibilita que o produto seja armazenado em áreas menores quando comparado com a matéria-prima inicial, diminuindo o espaço físico necessário para estocagem;

6) produto de fácil manuseio, pelo fato de ser um produto uniforme e de pequenas dimensões;

7) transformação de resíduos em combustíveis, pois a peletização é realizada na sua grande maioria com subprodutos que seriam descartados no ambiente;

8) controle da chama e homogeneidade de queima por causa, principalmente, das características de poder calorífico e alta densidade, com isso, as variações no processo nas caldeiras e fornalhas são menores, e;

9) conservação das características e propriedades do produto por longos períodos após armazenamento, já que a suscetibilidade às variações ambientais em decorrência da sua alta compactação é minimizada, mantendo-se principalmente a forma, densidade e umidade dos *pellets* conservados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

Para a produção dos *pellets* foram utilizados dois tipos de resíduos lignocelulósicos, bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto. Os resíduos foram doados pela empresa Eng-Maq®, situada no município de Boa Esperança do Sul, São Paulo.

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado foi proveniente do plantio da variedade RB867515 cuja as características são alta produtividade, alto teor de sacarose e médio teor de fibras (RIDESA, 2010). Durante o processamento para produção de etanol e açúcar a cana-de-açúcar passou pelos seguintes processamentos: 1) lavagem em água para diminuir as impurezas, 2) desfibramento mecânico das células realizado com a finalidade de facilitar o processo de extração dos açúcares, 3) extração do caldo através da moenda composta por quatro ternos (conjuntos de rolos) em série e, 4) processo de embebição em água realizada para extração do caldo residual.

As biomassas foram previamente secas ao ar, trituradas em moinho de martelo e selecionados com peneira de abertura de 6 mm. A caracterização do material foi realizada de acordo com as composições utilizadas para a produção dos *pellets* (Tabela 3).

Tabela 3 – Composições dos *pellets* a serem produzidos

Composição	Abreviação
100% bagaço de cana-de-açúcar	100BC
90% bagaço de cana-de-açúcar + 10% eucalipto	90BC+10E
80% bagaço de cana-de-açúcar + 20% eucalipto	80BC+20E
70% bagaço de cana-de-açúcar + 30% eucalipto	70BC+30E
60% bagaço de cana-de-açúcar + 40% eucalipto	60BC+40E
50% bagaço de cana-de-açúcar + 50% eucalipto	50BC+50E
40% bagaço de cana-de-açúcar + 60% eucalipto	40BC+60E
30% bagaço de cana-de-açúcar + 70% eucalipto	30BC+70E
20% bagaço de cana-de-açúcar + 80% eucalipto	20BC+80E
10% bagaço de cana-de-açúcar + 90% eucalipto	10BC+90E
100% serragem de eucalipto	100E

Fonte: A autora.

A umidade das biomassas foi determinada de acordo com a *European Norm* – EN 14774-1, *Deutsches Institut Für Normung* – DIN (2010a), mediante a relação entre massa seca e massa úmida.

Para a determinação da densidade a granel adotou-se a relação entre a massa do material em condições ambientes de temperatura e umidade relativa, e o volume do recipiente utilizado com base na EN 15103 (DIN, 2010b).

Para a análise de extrativos totais, lignina e cinzas; os resíduos foram triturados em moinho tipo *Willey* e classificados 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). Posteriormente, os resíduos foram acondicionados em sala climatizada para homogeneização da umidade (25°C e 60% UR).

O teor dos extrativos totais foi determinado conforme a norma 204 om-88 da *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* – TAPPI (1996). Para a determinação do teor de lignina insolúvel foi utilizado o método descrito por Gomide e Demuner (1986) e lignina solúvel em ácido sulfúrico, foi empregado o método de espectrofotometria, pela equação descrita por Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi resultado da soma das ligninas solúvel e insolúvel. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a EN 14775 (DIN, 2009).

Para a obtenção do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro adiabático e os procedimentos descritos na EN 14918 (DIN, 2010c). Posteriormente, o poder calorífico inferior foi estimado de acordo com a Equação 1.

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

em que: PCI é poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); PCS é poder calorífico superior (kcal kg⁻¹); e, H é o teor de hidrogênio do combustível (%).

Para o valor do teor de hidrogênio foi realizada uma estimativa média de acordo com valores encontrados na literatura para as duas biomassas utilizadas (PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a; 2014; VIANA, 2011), sendo o valor utilizado igual a 6,4 tanto para o bagaço de cana-de-açúcar quanto para a serragem de eucalipto. A densidade energética, foi obtida por meio da multiplicação entre poder calorífico inferior e densidade a granel da biomassa.

4.2 PRODUÇÃO E ANÁLISES DOS *PELLETS*

4.2.1 Produção dos *pellets*

Para a produção dos *pellets*, a granulometria de ambas as partículas encontravam-se entre 1 mm a 3,5 mm de diâmetro. A umidade das composições foram ajustadas com base em testes preliminares, de acordo com as características do material e do equipamento utilizado. O ajuste de umidade foi realizado com um pulverizador mecânico em misturador contínuo, utilizando água em temperatura ambiente, em que foi pulverizada sobre a biomassa e homogeneizada até atingir a umidade de 15% para peletização, verificada por meio de um medidor de umidade de grãos digital por meio de sondas em forma de hastes de aço com sensibilidade de medição entre 5% a 30% de umidade.

A densificação foi realizada em uma peletizadora, Eng-Maq® modelo 0400V, 40CV, matriz plana de 6 mm de diâmetro e capacidade para produção de 400 kg h⁻¹ (Figura 4). A temperatura da peletizadora, durante o processo de produção dos *pellets* variou de, aproximadamente, 80 a 95°C. Produziram-se aproximadamente, entre 5 e 7 kg de *pellets* por composição (Tabela 3).

Figura 4 – Peletizadora de matriz plana modelo – ENG 0400V 40CV



Fonte: Eng-Maq® (2016).

Para avaliação da qualidade dos *pellets* foram realizadas análises das propriedades físicas, energéticas, químicas e mecânicas, e comparadas com as exigências da EN 14961-6 (DIN, 2012a).

4.2.2 Avaliação das propriedades dos *pellets*

Foram caracterizados umidade, densidade a granel, teor de cinzas, poder calorífico inferior e densidade energética dos *pellets* utilizando-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente para caracterização dos resíduos.

O diâmetro (mm) e o comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos conforme a EN 16127 (DIN, 2012b), com a medição realizada com paquímetro digital. Utilizou-se o método estereométrico para determinar a densidade aparente unitária dos *pellets*. O volume foi calculado considerando-se a forma cilíndrica dos *pellets* com sua massa obtida por meio de balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Para ambos os ensaios, foram amostrados, aleatoriamente, 25 *pellets* de cada composição. A taxa de compactação foi calculada dividindo-se a densidade a granel dos *pellets* pela densidade a granel das composições dos *pellets*.

Ao utilizar um queimador de *pellets* Eng-Maq[®], pertencente ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, com sistema de alimentação automática com fornalha foram queimados 5 kg de *pellets* por composição e mediu-se a temperatura máxima de combustão. A ignição foi realizada de forma manual por meio de uma fonte artificial de calor incidida diretamente sobre os *pellets* durante 5 minutos, posteriormente, a câmara de combustão foi alimentada automaticamente com os *pellets* armazenados no depósito com rosca sem-fim, regulada a ventilação da câmara de combustão e monitorada a temperatura por meio do painel de controle até a combustão total do combustível.

Foi realizada a análise química imediata dos *pellets* produzidos, visando a determinação dos teores de materiais voláteis e carbono fixo, conforme procedimento estabelecido pela EN 14775 (DIN, 2009).

Avaliou-se a resistência à compressão diametral dos *pellets* (Equação 2), de forma semelhante à realizada por Cubero-Abarca et al. (2014), sendo utilizados 25 *pellets* selecionados aleatoriamente, por composição. O ensaio foi realizado com velocidade de 1 mm min⁻¹ em uma máquina de ensaio universal, ao utilizar uma célula de carga com capacidade para 500 quilos. O procedimento foi realizado com adaptação da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190, Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT (1997) devido ausência de normas específicas para essa análise em *pellets*.

$$\text{Compressão diametral(MPa)} = \frac{2 \times \text{Força máxima (N)}}{\pi \times \text{diâmetro (mm)} \times \text{comprimento(mm)}} \quad (2)$$

A porcentagem de finos e a durabilidade mecânica foram determinadas, ao utilizar o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, de acordo com a EN 15210-1 (DIN, 2010d), em que foram analisadas cinco amostras de 300 g de *pellets* por composição. Essas análises foram feitas no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

A porcentagem de finos e a durabilidade mecânica foram expressas de acordo com as Equações 3 e 4.

$$\text{Porcentagem de finos (\%)} = \frac{(\text{massa inicial} - \text{massa final})}{\text{massa final}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Durabilidade mecânica (\%)} = \frac{\text{massa inicial}}{\text{massa final}} \times 100 \quad (4)$$

4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a caracterização química das biomassas, umidade, poder calorífico inferior, densidade a granel, densidade energética das composições e dos *pellets* foram realizadas análises descritivas dos dados. Para as demais propriedades dos *pellets* foi considerado um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 11 tratamentos e diferentes números de repetições por variável analisada, pois cada propriedade foi obtida por meio de métodos laboratoriais específicos.

Para a comparação das médias em todas as situações, utilizou-se o teste de Scott-Knott, para os tratamentos que apresentaram diferenças significativas, a 5% de significância pelo teste F. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do software Sisvar versão 5.6, Build 86 (FERREIRA, 2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES E DOS *PELLETS*

De forma geral, pode-se observar que a quantidade de extrativos e lignina alterou-se em função da biomassa e de suas composições. Observa-se ainda que os teores de extrativos totais diminuíram à medida que se tem uma maior porcentagem de serragem de eucalipto na composição dos mesmos e o inverso é observado para o teor de lignina (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores médios para os teores de extrativos totais e lignina total das composições das biomassas avaliadas

Composição	Extrativos Totais (%)	Lignina Total (%)
100BC	15,8	27,45
90BC+10E	15,6	27,74
80BC+20E	13,8	28,10
70BC+30E	13,2	28,93
60BC+40E	11,7	29,48
50BC+50E	10,6	29,61
40BC+60E	8,3	31,04
30BC+70E	5,9	31,68
20BC+80E	4,9	32,39
10BC+90E	4,5	32,40
100E	3,7	32,61

BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto.

O teor de extrativos totais do bagaço de cana-de-açúcar foi 4,3 vezes maior do que o teor de extrativos observado para a serragem de eucalipto. As maiores variações ocorreram entre as composições 50BC+50BC, 40BC+60E e 30BC+70E, cerca de 28,9% entre elas. Dessa forma é possível notar a influência das composições nos resultados para essa análise.

O bagaço de cana-de-açúcar apresentou teor de extrativos totais de 15,8%, diferente dos valores relatados por Paula et al. (2011), Pitarelo (2013) e Protásio et al. (2013b), 31,76%, 4,10% e 16,6%, respectivamente. Os resultados encontrados por esses autores diferiram dos deste trabalho provavelmente porque a cana-de-açúcar originalmente pode ter passado por processos diferenciados de pré-tratamento antes do processamento, o que interfere diretamente nas características dos resíduos resultantes (PAULA, 2010).

Aproximadamente de 3 a 10% da madeira seca é constituída de extrativos, os quais possuem compostos que contribuem positivamente para o poder calorífico (KLOCK, ANDRADE, 2013). O valor encontrado no presente estudo está dentro da faixa de teor de extrativo citado por estes autores. Valores semelhantes foram encontrados por Protásio et al. (2013ab) para serragem de diversos clones de eucalipto. No entanto, o valor encontrado está abaixo dos relatados por Paula et al. (2011).

Desta forma a quantidade de extrativos presentes nas composições facilitam a decomposição dos componentes estruturais da madeira, diminuindo a energia de ativação necessária (PROTÁSIO et al., 2013b). Além disso, em seus estudos Nielsen et al. (2009), concluíram que os extrativos atuam como lubrificantes durante o processo de peletização, diminuindo as exigências de energia durante a densificação da matéria-prima lignocelulósica.

A média do teor de lignina da serragem de eucalipto foi 15,8% maior do que a média obtida pelo bagaço de cana-de-açúcar. Já a maior variação encontrada entre as composições foi de 4,6% entre as composições 50BC+50E e 40BC+60E. Desse modo, observa-se que essa maior variação ocorreu na transição das composições com maiores proporções de bagaço de cana-de-açúcar para as composições com maiores proporções de serragem de eucalipto. Portanto, constata-se a influência das proporções entre as biomassas nos resultados encontrados.

De acordo com a literatura, o teor de lignina do bagaço de cana-de-açúcar pode variar entre 19,1% e 31,4% (CANILHA et al., 2007; MARABEZI, 2009; PAULA et al., 2011; PITARELO, 2007; PROTÁSIO et al., 2013a), sendo o resultado encontrado nesta pesquisa condizente com estes valores. Para a serragem de eucalipto o resultado obtido no presente trabalho está próximo aos valores de diversas espécies de eucalipto (GUIMARÃES et al., 2013; PAULA et al, 2011), podendo chegar a níveis superiores a 35% segundo estudo de Protásio et al. (2013b).

Os altos valores encontrados para a lignina total são desejáveis para a produção energética, pois 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. Portanto, maiores teores de lignina contribuem positivamente no processo e conseqüentemente, resultam em *pellets* com melhores características, como por exemplo, físicas e mecânicas. Além disso, a lignina apresenta maior teor de carbono, em relação à celulose e

hemicelulose e maior estabilidade térmica devido sua constituição aromática (PROTÁSIO et al, 2013a).

Na média, as composições das biomassas apresentaram 11,3% de umidade antes da realização do ajuste necessário para a peletização (Tabela 5). Dessa forma, mesmo o valor da umidade das composições estando dentro da faixa de umidade apropriada para o processo de peletização, foi necessário um ajuste de umidade das mesmas para 15%, em decorrência das características da peletizadora utilizada.

Tabela 5 – Valores médios para umidade, densidade a granel, taxa de compactação, cinzas e poder calorífico inferior das composições entre as biomassas e dos *pellets* avaliados

	Composições	U (%)	DG (kg m⁻³)	TC	CZ (%)	PCI (MJ kg⁻¹)
Biomassas	100BC	11,35	120,00	-	0,83	16,56
	90BC+10E	11,35	132,00	-	0,75	16,54
	80BC+20E	10,96	144,00	-	0,65	16,61
	70BC+30E	11,10	156,00	-	0,64	16,80
	60BC+40E	10,98	168,00	-	0,54	16,66
	50BC+50E	10,89	188,00	-	0,47	16,64
	40BC+60E	11,67	192,00	-	0,46	16,82
	30BC+70E	11,57	204,00	-	0,38	16,75
	20BC+80E	11,41	216,00	-	0,28	17,44
	10BC+90E	11,40	228,00	-	0,25	17,07
	100E	11,41	240,00	-	0,14	17,57
Pellets	100BC	6,28	495,87	4,13	0,95	17,80
	90BC+10E	7,17	499,75	3,79	0,94	17,82
	80BC+20E	7,14	514,51	3,57	0,80	17,91
	70BC+30E	8,82	516,45	3,31	0,52	17,93
	60BC+40E	8,86	537,45	3,20	0,40	17,96
	50BC+50E	7,53	537,83	2,86	0,37	17,97
	40BC+60E	7,90	541,11	2,82	0,37	18,00
	30BC+70E	8,17	558,08	2,74	0,35	18,03
	20BC+80E	8,81	561,15	2,60	0,35	18,07
	10BC+90E	7,46	587,31	2,58	0,20	18,19
	100E	7,27	608,11	2,53	0,15	18,42

U: umidade; DG: densidade a granel; TC: taxa de compactação; CZ: cinzas; PCI: poder calorífico inferior; BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto.

De acordo com a literatura a umidade final de *pellets* 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), estando em consonância com os resultados encontrados nesta pesquisa. A média geral encontrada foi de 7,8% de

umidade, uma redução de 31% em relação as médias obtidas para a caracterização das composições entre as biomassas, se considerar a umidade ajustada, a redução foi de 48%. Dessa forma, constata-se que o processo de peletização contribuiu para a diminuição dos níveis de umidade dos *pellets* em relação à umidade inicial das composições de origem.

A diminuição da umidade pode ser atribuída à geração de atrito entre a matriz peletizadora e a biomassa durante o processo de densificação, o que ocasiona aumento de temperatura e, conseqüentemente, evaporação de parte da água contida nas partículas da biomassa. Dessa forma, *pellets* com umidade inferior a 10% tem seu tempo de estocagem prolongado, além de favorecer a utilização energética, pois quanto menor a quantidade de água presente nos mesmos, maior será seu valor energético (FARIA et al., 2016).

De acordo com a EN 14961-6 (DIN, 2012a), *pellets* do tipo A, provenientes de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas, apresentam valores menores que 13,6%, para a umidade na base seca. Portanto, os *pellets* avaliados atenderam à referida norma nesse requisito, podendo ser comercializados nos países da União Europeia.

O menor valor de densidade a granel foi observado para o bagaço de cana-de-açúcar, valor diferente do encontrado por Almeida, (2015) de 189,96 kg m⁻³. Já a serragem de eucalipto apresentou valor superior ao citado por Protásio et al., (2013a) de 217,58 kg m⁻³. Observou-se ainda, que a densidade a granel da serragem de eucalipto foi duas vezes maior do que a do bagaço de cana-de-açúcar, e a variação entre as composições em média foi de 10% (Tabela 5).

Observa-se que, a densidade a granel para os *pellets* 100BC foi encontrado o menor valor médio, em contrapartida, estes apresentaram a maior taxa de compactação em decorrência da menor densidade a granel apresentada pela biomassa, proporcionando aumento de 495,16% nessa propriedade. No entanto, apesar do ganho relativo menor, os *pellets* com maiores porcentagens de serragem de eucalipto apresentaram os maiores valores para essa propriedade.

Verificou-se ainda, uma relação inversamente proporcional entre a densidade a granel e a taxa de compactação dos *pellets*. Nesse sentido, Protásio et al. (2011), afirmam que quanto menor a densidade a granel da biomassa, melhor será a acomodação das partículas e, portanto, maior será o aumento percentual da sua densidade após a compactação, corroborando com os resultados encontrados.

Apenas os *pellets* 100E enquadraram-se nas exigências da EN 14961-6 (DIN,

2012a), que estabelece valor mínimo de 600 kg m^{-3} para densidade a granel. Os resultados encontrados neste trabalho foram inferiores aos encontrados por Faria et al. (2016), que trabalharam com *pellets* de resíduos da cafeicultura e madeira de eucalipto e pelos determinados por Almeida (2015), para *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, que relataram valores médios de 728 kg m^{-3} e acima de 700 kg m^{-3} , respectivamente.

Apesar dos resultados não atenderem às exigências para comercialização, nota-se que, com a peletização ocorreu uma grande redução de volume do material, o que implica em um armazenamento de energia maior em um menor espaço para estocagem. Além disto, existe a vantagem de diminuir os custos com o transporte, pois uma quantidade superior de biomassa poderá ser transportada em um mesmo espaço físico por unidade de volume.

Para atingir as exigências de comercialização recomenda-se proceder alterações nas variáveis do processo de peletização de acordo com cada composição, pois biomassas com maiores densidades necessitam de maiores pressões, já que quanto maior a densidade a granel, maior é a resistência à densificação.

Em relação ao teor de cinzas, observa-se que estes diminuíram à medida que se teve uma maior porcentagem de serragem de eucalipto (Tabela 5). A quantidade de cinzas presentes na serragem de eucalipto foi 5,9 vezes menor quando comparado ao encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados apresentaram variações relevantes para todas as composições. Nesse sentido, segundo Tavares e Santos (2013), o fato das composições serem constituídas por misturas entre biomassas em diferentes proporções há uma certa influência direta na variação dos resultados encontrados para a análise química dos mesmos.

O teor de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foi semelhante ao encontrado por Paula et al. (2010) de 0,80%. Porém, Pitarelo, (2013) e Protásio et al. (2013a) obtiveram valores superiores ao obtido neste trabalho. 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), assemelhando-se ao observado neste trabalho.

Em relação aos resultados encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar a variação no teor de lignina e a diferença no percentual de cinzas podem ocorrer em função da variedade da cana-de-açúcar empregada, clima e localização geográfica

dos locais de cultivo, adubação, irrigação e sistema de colheita (MARABEZI, 2009). Além disto, podem estar relacionados a impurezas, como terra e fuligem, causado pelo processo de moagem e local de armazenamento do resíduo após o processamento (ERNESTO, 2009).

Segundo Protásio et al. (2013a), teores de cinzas acima de 3% para madeira e 10% para outras biomassas são indesejáveis, uma vez que podem diminuir o poder calorífico fazendo com que a matéria-prima lignocelulósica se torne menos eficiente como combustível. Além disso, quanto maior o conteúdo de cinzas presente no material, maior será as emissões de partículas e formação de incrustações e depósitos nas superfícies onde ocorre transferência de calor nos equipamentos de combustão (RABAÇAL, 2010).

Por se tratar de resíduos de origem agrícola e florestal o teor de cinzas é variável, existindo uma variação do teor de cinzas em cada tipo de biomassa. De acordo com Ribeiro (2012), o tipo de matéria-prima utilizada bem como a sua origem, modo de transporte e método de produção, influenciam a formação de cinzas durante a combustão dos *pellets*.

Pode-se observar nos resultados que os *pellets* obtidos têm comportamento semelhante ao observado nas composições das biomassas. Não houve diferenças relevantes entre os valores encontrados ao se comparar com aqueles obtidos na caracterização dos resíduos lignocelulósicos utilizados. O maior valor encontrado foi para os *pellets* 100BC (0,95%) e o menor valor para os *pellets* 100E (0,15%). Já a maior variação encontrada foi de 53,8% entre os *pellets* 80BC+20E e 70BC+30E.

Todos os *pellets* apresentaram baixo de teor de cinzas, atendendo as exigências da EN 14961-6 (DIN, 2012a) e foram classificados como *pellets* do tipo A, pois apresentaram teores de cinzas inferiores a 5%. Dessa forma, o resultado encontrado pode ser considerado vantajoso uma vez que baixos níveis de minerais contribuem positivamente no desempenho dos combustíveis durante a combustão e contribuem para o menor desgaste dos equipamentos de combustão, diminuindo a necessidade de manutenção periódica, conforme já discutido anteriormente.

O poder calorífico inferior está dentro do encontrado por vários autores, isto é, entre $14,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ e $17,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ (PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a; QUIRINO et al., 2004; VIANA, 2011) para diversas biomassas lignocelulósicas. O maior valor encontrado foi para a composição 100E e o menor para a composição 100BC. A maior variação encontrada foi de 3,9% entre as composições 30BC+70E e 20BC+80E (Tabela 5).

Observa-se uma variação nos valores obtidos entre as composições, apesar disso, é perceptível uma tendência de aumento do poder calorífico inferior com aumento na porcentagem de serragem de eucalipto. Valores semelhantes foram encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto aos relatados na literatura (VIANA, 2011; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2013a)

Segundo Paula (2010), deve-se levar em conta que a constituição química dos resíduos influencia diretamente os parâmetros como o poder calorífico, o que é verificado neste trabalho. Além disso, outro fator que pode estar relacionado nos resultados obtidos está nas diferenças na forma de amostragem do material.

O processo de peletização resultou em aumento do poder calorífico inferior dos *pellets* produzidos, com ganhos de até $1,34 \text{ MJ kg}^{-1}$ para os *pellets* 50BC+50E, e os *pellets* com porcentagem acima de 50% de eucalipto apresentaram valores iguais ou superiores a 18 MJ kg^{-1} . Verificou-se, ainda, uma diferença percentual de 3,37% entre os *pellets* 100BC e 100E para essa propriedade. Essas diferenças no valor calórico podem estar relacionadas com a composição química das biomassas lignocelulósicas avaliadas.

Valores semelhantes para o poder calorífico inferior foram relatados por Faria et al. (2016) e Monteiro et al. (2014), para resíduos da cafeicultura e madeira de eucalipto, e resíduos da indústria corticeira, 17,66 a $21,03 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Observa-se que os teores de materiais voláteis diminuíram à medida que aumentou a porcentagem de serragem de eucalipto na composição dos *pellets* (Tabela 6). Valores similares, entre 73,15% e 85,24% foram encontrados por Silva (2016) e Souza (2016), para *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, resíduos do processamento da madeira de eucalipto e diferentes resíduos do café. Os *pellets* constituídos por 100% bagaço de cana-de-açúcar apresentaram um conteúdo de materiais voláteis 3,3% maior do que os *pellets* constituídos por 100% serragem de eucalipto.

Um alto teor de materiais voláteis pode afetar o processo de combustão em geral, e combustíveis com essa característica são mais rapidamente queimados (VIEIRA, 2012). A emissão rápida de materiais voláteis contribui decisivamente para acelerar a ignição do combustível, em uma temperatura inferior. Dessa forma, espera-se que os *pellets* produzidos apresentem comportamento semelhante nas etapas iniciais da combustão, pois o teor de materiais voláteis encontrado apresentou baixa variação, ou seja, inferior a 4%.

Tabela 6 – Valores médios para teor de materiais voláteis e carbono fixo dos *pellets*

<i>Pellets</i>	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
100BC	82,53	16,52
90BC+10E	82,51	16,55
80BC+20E	82,19	17,01
70BC+30E	81,82	17,66
60BC+40E	81,44	18,16
50BC+50E	81,30	18,33
40BC+60E	81,03	18,60
30BC+70E	80,68	18,87
20BC+80E	80,59	19,06
10BC+90E	80,54	19,26
100E	79,84	20,01

BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto.

Comportamento inverso foi observado para teor de carbono fixo em relação ao teor de materiais voláteis, ou seja, observou-se um aumento no teor de carbono fixo com aumento da porcentagem de serragem de eucalipto das composições. Os maiores valores de carbono fixo foram observados para os *pellets* produzidos com percentual igual ou superior a 40% de eucalipto.

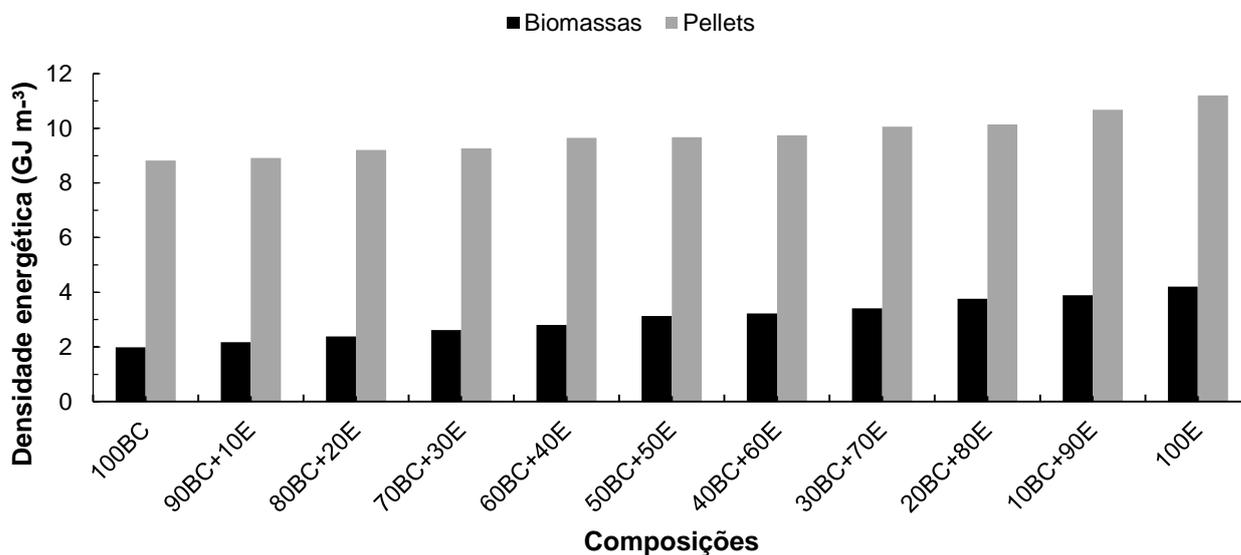
Em termos gerais, Spanhol et al. (2015), Obernberger e Thek (2002), e Werther et al. (2000) obtiveram teores e de carbono fixo entre 14% a 25% para biocombustíveis sólidos de diferentes procedências. Segundo esses autores, combustíveis com alto índice de carbono fixo queimam mais lentamente, implicando maior tempo de permanência destes dentro dos queimadores, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo.

O processo de peletização proporcionou aumento significativo da densidade energética dos *pellets* comparativamente às composições das biomassas *in natura* (Figura 5). Após a densificação, os *pellets* com maiores porcentagens de bagaço de cana-de-açúcar (100BC, 90BC+10E, 80BC+20E, 70BC+30E e 60BC+40E) apresentaram ganhos de até 343% na densidade energética inferior. No entanto, os *pellets* com percentual superior a 50% de eucalipto em suas constituições apresentaram os maiores valores para essa propriedade com ganhos em densidade energética inferior de até 186%, em comparação com os valores obtidos na caracterização das composições das biomassas.

Ao avaliarem *pellets* de película prateada, casca de café e madeira de eucalipto, Faria et al. (2016) encontram um aumento entre 262% e 551%. Já, Garcia, Caraschi e Ventrone (2013), para *pellets* comerciais de madeira de três estados brasileiros encontraram densidade energética inferior média de 11,12 GJ m⁻³,

semelhante ao valor encontrado para os *pellets* 100E no presente trabalho. Entretanto, Camargo (2013) encontrou valor superior em 7,3% para *pellets* de maravalha de *Eucalyptus* ao comparado com o presente estudo.

Figura 5 – Valores médios de densidade energética das biomassas e dos *pellets*



BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto.

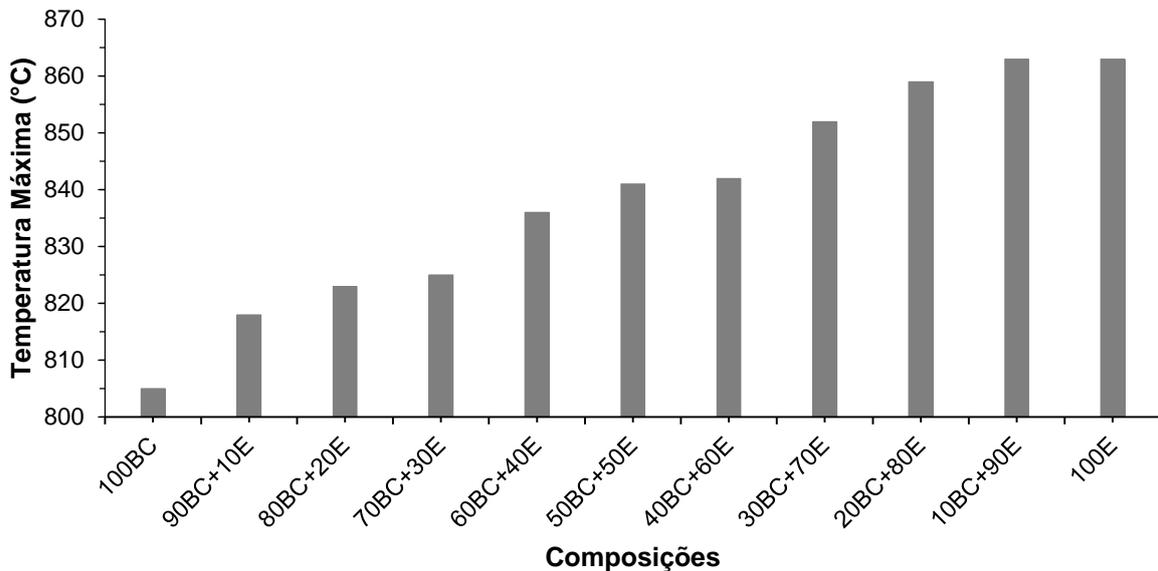
Apesar das variações existentes, o processo de peletização viabiliza a utilização energética, para fins domésticos ou industriais, dos resíduos e suas respectivas composições estudadas neste trabalho, uma vez que há um grande benefício em relação ao aumento da quantidade de energia por unidade de volume. Pois segundo Protásio et al. (2015), a densidade energética representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de determinado volume de combustível, ou seja, os *pellets* com maior densidade energética liberam uma maior quantidade de energia por unidade volumétrica durante a sua queima, além de viabilizar o transporte dos mesmos a longas distâncias.

Em relação à temperatura de combustão (Figura 6) pode-se observar um comportamento crescente da temperatura máxima atingida pelos *pellets* durante a combustão, assim como observado para as demais características energéticas já discutidas com influência direta das características das composições entre as biomassas.

A variação total de temperatura foi 58°C (6,7%), os *pellets* com porcentagem igual ou superior a 70% de eucalipto apresentaram temperatura máxima superior a 850°C, o menor valor obtido para temperatura foi 805°C para os *pellets* 100BC e o

maior foi de 863°C para os *pellets* 10BC+90E e 100E. As temperaturas máximas encontradas estão condizentes com o mencionado por Barros (2013), que menciona valores na ordem dos 800 a 1000°C para a queima completa da biomassa peletizada, podendo variar de acordo com o equipamento utilizado.

Figura 6 – Temperatura máxima de combustão dos *pellets*



BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto.

O comportamento observado em relação à temperatura máxima fornece 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).

5.2 PROPRIEDADES DOS PELLETS

Apesar das dimensões dos *pellets* serem controladas por meio do processo de peletização e estabelecidas principalmente por ajustes do equipamento de produção e pelo modo em que o processo é conduzido, os *pellets* com maiores porcentagens de bagaço de cana-de-açúcar (100BC, 90BC+10E, 80BC+20E, 70BC+30E, 60BC+40E e 50BC+50E) obtiveram os maiores diâmetros observados, no entanto, para os mesmos *pellets* observou-se os menores comprimentos (Tabela 7). O inverso foi observado para os *pellets* com maiores quantidades de eucalipto em suas composições.

Tabela 7 – Valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* avaliados

<i>Pellets</i>	Propriedades físicas			Propriedades mecânicas		
	C (mm)	D (mm)	DU (kg m ⁻³)	Compressão diametral (MPa)	Finos (%)	Durabilidade mecânica (%)
100BC	24,21 e	6,42 a	1.142 d	3,02 e	0,08 a	91,50 f
90BC+10E	27,88 d	6,43 a	1.160 d	3,77 d	0,09 a	93,08 e
80BC+20E	27,68 d	6,44 a	1.161 d	3,85 d	0,07 a	93,88 d
70BC+30E	24,68 e	6,34 b	1.161 d	5,90 c	0,07 a	95,68 c
60BC+40E	26,05 e	6,44 a	1.174 c	6,19 c	0,07 a	96,28 b
50BC+50E	27,09 d	6,39 a	1.189 c	6,27 c	0,07 a	96,37 b
40BC+60E	27,49 d	6,31 b	1.194 c	6,69 b	0,06 a	96,50 b
30BC+70E	29,09 d	6,23 c	1.209 b	10,80 a	0,06 a	96,57 b
20BC+80E	30,19 c	6,26 c	1.228 b	10,89 a	0,05 a	96,58 b
10BC+90E	35,34 a	6,24 c	1.247 b	10,88 a	0,05 a	96,55 b
100E	32,35 b	6,23 c	1.280 a	11,04 a	0,05 a	97,40 a

C: comprimento; D: diâmetro; DU: densidade unitária; BC: bagaço de cana-de-açúcar; E: eucalipto. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Observou-se uma pequena variação de 0,21 mm (3,3%) no diâmetro dos *pellets* (matriz perfurada de 6 mm de diâmetro) e o comprimento médio entre 24,21 e 35,34 mm. Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados na literatura para *pellets* de diferentes materiais lignocelulósicos (FARIA et al., 2016; SOUZA, 2016; MONTEIRO et al., 2014).

A variação nos resultados pode ter ocorrido pelo processo, provavelmente, não ter sido totalmente homogêneo, ocorrendo alterações no fluxo de alimentação do equipamento e em decorrência do tempo de permanência do material na matriz perfurada durante a peletização. Além disso, a densidade das biomassas interfere o processo de densificação como discutido anteriormente.

Outro fator que pode estar relacionado é a expansão dos *pellets* pela migração de vapor de água para as extremidades dos mesmos durante a peletização. Além disto, a quantidade do material peletizado influencia diretamente o processo de produção, interferindo na padronização das dimensões dos *pellets* produzidos. Menores variações são esperadas em processos de produção com alimentação constante.

O diâmetro e comprimento dos *pellets* atenderam às exigências estabelecidas pela EN 14961-6 (DIN, 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. Segundo Monteiro et al. (2014), as dimensões dos *pellets* é um parâmetro

importante a ser considerado, especialmente nos sistemas de alimentação dos equipamentos de combustão e diâmetros menores permitem uma combustão mais uniforme, comparativamente aos *pellets* de maiores diâmetros.

A densidade aparente unitária variou 12,1%. Os *pellets* 100BC, 90BC+10E, 80BC+20E e 70BC+30E obtiveram as menores médias para esta propriedade (Tabela 7). Estudos de Almeida (2015) apontaram valor médio de 1.140 kg m⁻³ para *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, semelhante ao encontrado no presente trabalho. Os valores obtidos para essa propriedade estão em consonância com os relatados por Faria et al., (2016) para *pellets* produzidos a partir de misturas de diferentes resíduos do processamento do café e madeira de eucalipto.

Altas densidades unitárias são desejáveis para os *pellets*, uma vez que otimiza o transporte a maiores distâncias e o espaço em locais de armazenamento, quando comparado a outros combustíveis tradicionais, reduzindo assim os gastos.

Os valores de compressão diametral variaram entre 3,02 a 11,04 Mpa. Os *pellets* com percentual igual ou superior a 70% de eucalipto apresentaram as maiores médias. O maior ganho observado foi de 61,9% entre os *pellets* 40BC+60E e 30BC+70E (Tabela 7). Os valores médios obtidos foram maiores do que os observados por Silva (2016), para *pellets* de diferentes biomassas, entre elas o bagaço de cana-de-açúcar e Faria et al. (2016) para *pellets* produzidos com resíduos da cafeicultura.

A alta compressão diametral atingida pelos *pellets* 30BC+70E, 20BC+80E, 10BC+90E e 100E proporciona uma melhor resistência ao serem submetidos constantemente a impactos, quedas, abrasões e compressões, sobretudo durante o manuseio, transporte e armazenamento.

Em relação ao teor de finos, que está diretamente relacionado com a durabilidade mecânica dos biocombustíveis sólidos, observa-se que não houve diferença significativa entre as médias dos *pellets* avaliados (Tabela 7). Silva (2016), para *pellets* de diferentes biomassas, observou teor de finos variando entre 0,01 e 0,03%. Portanto, os resultados encontrados no presente estudo foram superiores aos relatados pela autora mencionada.

O baixo teor de finos encontrado pode ser considerado um resultado vantajoso, pois segundo Faria et al. (2016), maiores percentagens de finos acarretam problemas na gestão e uso desses combustíveis, inviabilizando a comercialização dos mesmos. Todos os *pellets* se enquadraram na EN 14961-6

(DIN, 2012a), sendo classificados como do tipo A, pois o estabelecido pela norma para essa classificação são valores inferiores ou iguais a 2% de finos.

Quanto à durabilidade mecânica, as menores médias foram obtidas pelos *pellets* 100BC, 90BC+10E, 80BC+20E, 70BC+30E (Tabela 7). Garcia (2010) e Spanhol (2015) para *pellets* de madeira de diversas procedências, obtiveram valores entre 96,3 a 99,07% para durabilidade mecânica. Portanto, os valores encontrados para *pellets* acima de 40% de eucalipto estão em consonância com os estudos apresentados. Os *pellets* que apresentaram baixa durabilidade mecânica são indesejáveis, visto que segundo Faria et al. (2016), tendem a se desintegrar com facilidade durante seu manuseio, armazenamento ou transporte.

Apenas os *pellets* com até 70% bagaço de cana-de-açúcar em suas constituições não atenderam ao requisito mínimo da EN 14961-6 (DIN, 2012a), que exige como classificação, para *pellets* do tipo B, valores de durabilidade mecânica iguais ou superiores a 96%.

Uma das prováveis explicações para as diferenças nas propriedades mecânicas dos *pellets*, de acordo com Cubero-Abarca et al. (2014), é a agregação das diferentes partículas, durante o processo de peletização. Para solucionar esse problema, recomenda-se a alteração de variáveis de produção, como pressão e temperatura de prensagem.

Na Tabela 8 está um resumo da comparação entre *pellets* produzidos e as exigências mínimas observadas pela EN 14961-6 (DIN, 2012a).

Tabela 8 – Comparação dos *pellets* com a norma utilizada neste trabalho

Parâmetros	100BC	90B +10E	80BC +20E	70BC +30E	60BC +40E	50BC +50E	40BC +60E	30BC +70E	20BC +80E	10BC +90E	100E
Umidade (< 13,6%)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Densidade a Granel (≥ 600 kg m ⁻³)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Comprimento (3,15 - 40,0 mm)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Diâmetro (6 ± 1mm)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cinzas (< 5%)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Finos (≤ 2%)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Durabilidade Mecânica (≥ 96%)	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

x: Parâmetro não atendido; ✓: Parâmetro atendido.

Considerando-se a adequação das propriedades dos *pellets* de cada uma das composições avaliadas às especificações da norma internacional apresentada na Tabela 8, pode-se observar que os *pellets* avaliados encontram-se aptos a comercialização em relação aos parâmetros de umidade, comprimento e diâmetro, cinzas, e teor de finos. Apenas os *pellets* com 100% eucalipto apresentaram densidade a granel mínima exigida para comercialização. Em relação a durabilidade mecânica, os *pellets* produzidos com porcentagem acima de 70% bagaço de cana-de-açúcar em suas constituições não atenderam às especificações quanto a essa propriedade utilizada pela norma.

A baixa densidade a granel apresentada pelo bagaço de cana-de-açúcar pode ter influenciado nos resultados obtidos para essas propriedades, além das condições de peletização, ou seja, as variáveis do processo, ambos já discutidos ao longo do trabalho.

6 CONCLUSÕES

- O bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de eucalipto individualmente e de forma composta apresentaram características desejáveis para utilização energética por meio do processo de peletização.

- As composições influenciaram as propriedades dos *pellets*, pois porcentagens acima de 70% de bagaço de cana-de-açúcar proporcionaram *pellets* com características inferiores quando comparados àqueles com proporções maiores de serragem de eucalipto.

- De forma geral, *pellets* produzidos com porcentagens acima de 60% de serragem de eucalipto apresentaram melhores desempenhos para as características avaliadas.

- A composição constituída por 100% serragem de eucalipto destacou-se na produção de *pellets* com melhores características energéticas.

- A densidade unitária, o poder calorífico inferior, a umidade, o teor de cinzas e teor de finos apresentaram características satisfatórias à exportação para todos os *pellets* produzidos.

- A durabilidade mecânica apresentou níveis aceitáveis para os *pellets* produzidos com proporções acima de 40% de serragem de eucalipto em suas constituições.

- Negativamente, os *pellets* produzidos apresentaram baixa densidade a granel, exceto os *pellets* com 100% serragem de eucalipto.

- A utilização de diferentes composições entre resíduos lignocelulósicos se mostram aptos para produção de *pellets* resultando em um biocombustível de qualidade.

7 RECOMENDAÇÕES

Destaca-se que após os resultados obtidos no presente trabalho novas pesquisas sejam realizadas, no intuito de se avaliar a viabilidade econômica da produção de *pellets* em diferentes composições para apontar de forma segura qual melhor composição, considerando todos os aspectos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. F. P. **Pelletização 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – ABIB. **Industrial woodpellets Brasil**: desenvolvimento da maior planta industrial no Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/12947>>. Acesso em 18 set. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE *PELLETS* – ABIPEL. **Produtores de pellets**. 2015. Disponível em: <<http://www.abipel.com.br/>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

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

BARROS, C. F. A. **Produção de pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União Federativa do Brasil**. Brasília, n. 147, 3 ago. 2010, Seção 1, p. 3-7.

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.

CANILHA, L. et al. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar *in natura*, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol. **Bioquímica e Biotecnologia**. Associação Brasileira de Química – ABQ. 2007. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/11/11-570-713.htm>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

CARASCHI, J. C. et al. Avaliação das propriedades dos *pellets* para fins energéticos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 21., 2013, Piracicaba. **Anais...** Disponível em: <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=2894&numeroEdicao=21>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

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 Bio energy**, [s.l], v. 35, p. 402-410, 2011.

CHAVES, A. M. B. et al. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p.533-542, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 1. Safra 2014/2015, n. 4, Quarto Levantamento. Brasília: CONAB, 2015. 34 p. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 11 ago. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 3. Safra 2016/17, n. 2, Segundo Levantamento. Brasília: CONAB, 2016. 72 p. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 26 set. 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, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 14775**: determination of ash content. Berlin: CEN, 2009. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 14774-1**: determination of moisture content – oven dry method – Part 1: total moisture – reference method. Berlin: CEN, 2010a. 10 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 15103**: determination of bulk density. Berlin: CEN, 2010b. 14 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 14918**: determination of calorific value. Berlin: CEN, 2010c. 63 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 15210-1**: solid biofuels – determination of mechanical durability of *pellets* and briquettes – Part 1: *pellets*. Berlin: CEN, 2010d. 12 p.

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

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. **EN 16127**: Determination of length and diameter of *pellets*. Berlin: CEN, 2012b. 11 p.

DIAS, J. M. C. S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional 2015 – Ano base 2014**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2015. 62 p.

ENG-MAQ. **Peletizadora de matriz plana modelo – ENG 0400V 40CV**. Disponível em: <<http://www.engmaq.com.br/index.php?id=75>>. Acesso em: 17 out. 2016.

ERNESTO, V. A. R. T. **Caracterização térmica do bagaço de cana-de-açúcar visando aproveitamento energético**. 2009. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009.

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.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FONSECA, B. G. **Destoxificação biológica de hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar empregando leveduras *Issatchenkia occidentalis* e *Issatchenkia orientalis***. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

FUTURE METRICS LLC. **Global industrial wood pellet markets – future demand and future prices**. Disponível em: <<http://www.futuremetrics.info>>. Acesso em: 18 nov. 2016.

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

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C. A expansão do mercado de *pellets* de madeira. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 131, p. 56-59, 2012.

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

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.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e de madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

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.

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

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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ**. 2016. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2016.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 4. ed. Curitiba: UFPR, 2013. 87p.

LOBO, C. S. **A importância da cogeração utilizando bagaço de cana-de-açúcar como forma de diversificação da matriz elétrica**. 2013. 118 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físico-Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

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

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

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.

NOVA CANA. 2016. **Bagaço e palha da cana podem ganhar o mundo e abrir novo mercado para as usinas**. 2016. Disponível em: < <https://www.novacana.com/n/cana/mercado/bagaco-cana-ganhar-mundo-novo-mercado-usinas-110316/>>. Acesso em: 14 maio 2016.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their composition behavior. In: THE FIRST WORLD CONFERENCE ON PELLETS. **Proceedings...** Estocolmo, 2002, p. 115 - 121.

OLIVEIRA, B. M. **Utilização de resíduos do processamento da madeira para a produção de briquetes** 2015. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, Salinas, 2015.

OLIVEIRA, C. M. **Executivo sumário industrial woodpellets Brasil**. Curitiba: ABIB, 2016.

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, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos**

lignocelulósicos. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PITARELO, A. P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PITARELO, A. P. **Produção de etanol celulósico a partir do bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor**. 2013. 162 p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014.

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. 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. et al. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v.1, n.2, p.173-182, 2004.

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.

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**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DENSENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO – RIDESA. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba: RIDESA, 2010. 136 p.

RIBEIRO, P. E. A. **Aglomeración de cinzas numa caldeira de pellets** – influência da temperatura e do fluxo de ar. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Guimarães, 2012.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis**: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação. 2010. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

SILVA, S. B. **Caracterização de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos**. 2016. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF. **As florestas plantadas**. 2015. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

SOUZA, H. J. P. L. **Caracterização de pellets de eucalipto e resíduos da despolpa do café**. 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2016.

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. 834-844, 2015.

TAVARES, S. R. L.; SANTOS, T. E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos. **Holos**, Natal, v. 5, p. 19-27, 2013.

TAVARES, M. A. M. E.; TAVARES; S. R. L. Perspectivas para a participação do Brasil no mercado internacional de *pellets*. **Holos**, Natal, v. 5, p. 292-306, 2015.

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

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para produção de materiais ecológicos**: o exemplo do resíduo de madeira. 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Mapa da produção**. 2016a. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **A bioeletricidade em números**. 2016b. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos/documentos/>>. Acesso em: 14 mai. 2016.

VIANA, L. F. **Potencial energético do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar, cv. SP80-1842, em área de alambique artesanal**. 2011. 102 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, n. 33, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, Hamburg, v. 26, n. 1, p. 1 - 27, 2000.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análises de variância para as propriedades físicas e mecânicas dos pellets em função da composição.

TABELA A1 – Análise de variância para comprimento e diâmetro dos pellets.

Fonte de Variação	G.L.	Comprimento			Diâmetro		
		Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F
Tratamentos	10	2691.51247	269.15125	22.7038 **	1.91553	0.19155	11.0929 **
Resíduos	264	3129.69580	11.85491		4.55877	0.01727	
Total	274	5821.20827			6.47430		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo a 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$).

TABELA A2 – Análise de variância para densidade unitária dos pellets.

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F
Tratamentos	10	450271.50968	45027.15097	13.2142 **
Resíduos	264	899578.37437	3407.49384	
Total	274	1349849.88405		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo a 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$).

TABELA A3 – Resumo da análise de variância para compressão diametral dos pellets.

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F
Tratamentos	10	2478.71724	247.87172	269.4300 **
Resíduos	264	242.87621	0.91999	
Total	274	2721.59345		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo a 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$).

TABELA A4 – Resumo da análise de variância para teor de finos e durabilidade mecânica dos pellets.

Fonte de Variação	G.L.	Teor de finos			Durabilidade mecânica		
		Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F
Tratamentos	10	0.00972	0.00097	1.4400 ns	169.38351	16.93835	71.9918 **
Resíduos	44	0.02971	0.00068		10.35239	0.23528	
Total	54	0.03944			179.73590		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$);

* significativo a 5% de probabilidade ($0.01 \leq p < 0.05$);

ns não significativo ($p > 0.05$).