

TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS DA CAFEICULTURA EM PELLETS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

Wigor Souza Faria¹, Thiago de Paula Protásio², Paulo Fernando Trugilho³, Bárbara Luísa Corradi Pereira⁴, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro⁵, Carlos Rogério Andrade⁶, José Benedito Guimarães Junior⁷

(Recebido: 23 de julho de 2015; aceito: 24 de agosto de 2015)

RESUMO: Dentre as inúmeras fontes de biomassa possíveis de serem utilizadas para fins energéticos, destacam-se os resíduos lignocelulósicos oriundos da cafeicultura. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o potencial dos resíduos do processamento dos grãos de café na produção de *pellets*, para a geração de energia térmica e classificá-los quanto à possibilidade de comercialização, utilizando-se a norma DIN EN 14961-6. Os *pellets* foram produzidos, considerando-se a seguinte composição (base à massa): 100% de casca de café; 100% de película prateada; 50% de casca de café e 50% de película prateada; 70% de casca de café e 30% de serragem de eucalipto e 70% de película prateada e 30% de serragem de eucalipto. Foi quantificada a umidade da biomassa *in natura*, bem como a densidade a granel e as densidades energéticas. Já nos *pellets*, foram avaliadas as propriedades físicas e energéticas (umidade, densidade unitária, densidade a granel, poderes caloríficos e densidades energéticas); propriedades químicas (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e propriedades mecânicas (resistência à compressão diametral, teor de finos e durabilidade). Os resíduos do processamento dos grãos de café podem ser transformados em biocombustíveis sólidos granulados, para a geração de energia calorífica. Os *pellets* de casca de café, película prateada, casca de café com película prateada e casca de café com madeira podem ser comercializados e exportados para a União Europeia, seguindo as exigências da norma DIN EN 14961-6.

Termos para indexação: Biocombustível sólido, energia renovável, biomassa, calor.

TRANSFORMATION OF LIGNOCELLULOSIC WASTE OF COFFEE INTO PELLETS FOR THERMAL POWER GENERATION

ABSTRACT: Among the numerous biomass sources possible to be used for energy purposes, lignocellulosic residues of coffee plantations are highlighted. Therefore, the objective of this study was to evaluate the potential of waste processing of coffee beans in pellet production for the generation of thermal energy, and classify them regarding marketability, using Standard DIN EN 14961-6. The pellets were produced considering the following composition (based on weight): 100% coffee hulls; 100% silver skin; 50% coffee hulls and 50% silver skin; 70% coffee hulls and 30% eucalyptus sawdust and 70% silver skin and 30% eucalyptus sawdust. Fresh biomass moisture was quantified, as well as bulk density and energy densities. For the pellets, physical and energetic properties (moisture, unit density, bulk density, heating values and energy densities) were evaluated, as well as chemical properties (volatile materials, ash and fixed carbon) and mechanical properties (resistance to diametral compression, fines content and durability). Waste processing of coffee beans can be transformed into granulated solid biofuels for the generation of heat energy. Coffee hull pellets, silver skin, coffee hulls with silver film and coffee hulls with wood can be marketed and exported to the European Union, following the requirements of Standard DIN EN 14961-6.

Index Terms: Solid biofuel, renewable energy, biomass, heat.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos países e regiões têm intensificado os investimentos nas energias renováveis como forma de redução das emissões de gases causadores de efeito estufa e como estratégia para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (GARCIA-MARAVÉ et al., 2015). Nesse sentido, o Brasil se destaca, pois,

de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2014, ano base 2013, 41% da oferta interna de energia é proveniente de fontes renováveis, sendo 24,4% proveniente da cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2014).

Dentre as inúmeras fontes de biomassa possíveis de serem utilizadas para fins energéticos, destacam-se os resíduos lignocelulósicos que,

^{1,2,6,7}Universidade Federal de Goiás - Regional Jataí - Câmpus Jatobá - Rodovia BR-364- Km 192 - Parque Industrial - Cx.P. 3 75.801615 - Jataí -GO -wigor.florestal@gmail.com, depaulaprotasio@gmail.com, jbguiamaraesjr@hotmail.com, cra.florestal@yahoo.com.br

³Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Ciências Florestais/DCF - Cx.P. 3037 - 37.200-000 - Lavras - MG trugilho@dcf.ufla.br

⁴Universidade Federal de Mato Grosso - Faculdade de Engenharia Florestal - Av. Fernando Corrêa da Costa, nº 236 - Bairro Boa Esperança - 78.060900 - Cuiabá - MT - babicorradi@gmail.com

⁵Universidade Federal de Viçosa/UFV - Departamento de Engenharia Florestal - Av. P.H. Rolfs, s/n - Câmpus da UFV - 36570-000 Viçosa - MG - cassiacarneiro@ufv.br

geralmente estão disponíveis em grandes quantidades e podem contribuir decisivamente para a descentralização da matriz energética brasileira. Sabe-se que o Brasil apresenta grande produção agrícola e florestal e, dessa forma, resíduos lignocelulósicos são gerados em abundância. Logo, a valorização energética desses materiais vegetais residuais é uma alternativa para aumentar a eficiência econômica e ambiental do processo produtivo e contribuir para a consolidação de uma matriz energética limpa e ambientalmente adequada.

Dentre as biomassas residuais com potencial energético, podem-se incluir os resíduos da cafeicultura. O Brasil é o maior produtor mundial de café, em uma área de 2.256.500 hectares e estima-se a produção de 44,11 a 46,61 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado para o ano de 2015 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015). Isso gera resíduos em grandes quantidades e com potencial para produção de bioenergia (CUBERO-ABARCA et al., 2014), como a casca externa ou exocarpo (PROTÁSIO et al., 2011, 2012, 2013; SAENGER et al., 2001), a madeira (LEITE et al., 2014, 2015a, 2015b), o pergaminho ou endocarpo (PAULA et al., 2011a, 2011b) e a película prateada ou perisperma do grão.

Quanto à produção de resíduos pelo setor, Dias et al. (2012) estimaram que, para cada tonelada de café beneficiado, são produzidos 1,25 toneladas de resíduos (casca externa e pergaminho). Dessa forma, com base nas estatísticas oficiais da CONAB (2015) pode-se calcular a disponibilidade brasileira atual desses materiais residuais de, aproximadamente, 3.402.000 toneladas para o referido ano.

Apesar das informações relatadas na literatura e anteriormente citadas sobre a potencialidade energética dos resíduos oriundos da cafeicultura, ainda existe carência de informações sobre a peletização desses materiais, especialmente aqueles advindos do processamento dos grãos de café, para a geração de energia térmica.

A peletização consiste na densificação da matéria-prima lignocelulósica particulada, por meio da extrusão do material pela pressão de dois ou mais rolos e isso ocorre através de uma matriz perfurada, com ou sem adição de ligantes (CASTELLANO et al., 2015). Esse processo permite a produção de *pellets*, que são biocombustíveis sólidos, granulados, cilíndricos, uniformes e com alta densidade energética,

comparativamente à matéria-prima de origem (CASTELLANO et al., 2015; GARCIA-MARAVÉ et al., 2015; PODDAR et al., 2014; THEERARATTANANOON et al., 2011). Os *pellets*, geralmente, apresentam diâmetro de 6 a 8 mm e comprimento variando de 10 a 40 mm. A baixa umidade e a uniformidade dos *pellets* lhes confere um desempenho na combustão mais eficiente que outros combustíveis renováveis tradicionais, como a lenha (CARROLL; FINNAN, 2012; GARCIA-MARAVÉ et al., 2015; MIRANDA et al., 2012).

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o potencial dos resíduos do processamento dos grãos de café, na produção de *pellets*, para a geração de energia térmica e classificá-los quanto à possibilidade de comercialização, utilizando-se a norma DIN EN 14961-6 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN, 2012a).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e caracterização da biomassa lignocelulósica

Os resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, ou seja, a casca e a película prateada provenientes do processamento dos grãos do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) foram coletados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Machado. Já a madeira de *Eucalyptus* sp. foi proveniente de um plantio, com 24 meses de idade, no Câmpus Jatobá da Universidade Federal de Goiás, no município de Jataí, sudoeste de Goiás.

A madeira de *Eucalyptus* foi devidamente processada em um moinho de facas, utilizando uma peneira com malha de, aproximadamente, 5,5 mm. A casca de café e a película prateada foram utilizadas na mesma granulometria que se encontravam, ou seja, com diâmetro máximo inferior a 6 mm.

A umidade (base úmida e base seca) das biomassas lignocelulósicas foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (DIN, 2010a), em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$, considerando-se três repetições.

Para a determinação da densidade a granel da biomassa tomou-se como base o material acondicionado em condições ambientes de temperatura e umidade relativa. Utilizou-se um tubo cilíndrico de, aproximadamente, 2.400 cm³ e três repetições. Por meio de uma balança analítica com precisão de 0,1 g foi determinada a massa acondicionada no volume de cada amostra. A densidade a granel da biomassa foi obtida dividindo-se a massa pelo volume da amostra.

Produção dos *pellets*

A densificação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, juntamente com madeira de eucalipto, foi realizada em uma peletizadora da marca Eng-Maq®, modelo 0200v, capacidade para produção de 110 kg h⁻¹ e matriz plana horizontal com 6 mm de diâmetro. A temperatura da peletizadora, durante a produção dos *pellets* varia de, aproximadamente, 80 a 95°C e a pressão de compactação é de, aproximadamente, 300 kgf cm⁻².

Com as biomassas na umidade de equilíbrio higroscópico, produziram-se, aproximadamente, 10 kg de *pellets* por tratamento, conforme delineamento apresentado na Tabela 1.

Propriedades físicas e energéticas dos *pellets*

A umidade dos *pellets* (base seca e base úmida) e densidade a granel foram obtidos utilizando-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para a biomassa lignocelulósica *in natura*.

O diâmetro (mm) e comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos, conforme a norma DIN EN 16127 (DIN, 2012b), com medição realizada em paquímetro digital. Nesse ensaio foram considerados cem *pellets* de cada tratamento.

A densidade aparente unitária dos *pellets* foi determinada, utilizando-se o método estereométrico, ou seja, o volume foi calculado considerando-se a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa foi obtida com o uso de balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Para esse procedimento foram amostrados, aleatoriamente, cem *pellets* de cada tratamento.

Para a obtenção do poder calorífico superior (PCS) foi utilizado um calorímetro digital da marca IKA C-200, de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2004). Esse ensaio foi

realizado considerando três repetições, sendo as amostras classificadas em peneiras de 40-60 *mesh* e secas em estufa a 105±2°C até massa constante. O poder calorífico inferior, base seca, foi estimado mediante a Equação 1:

$$PCI = PCS - (600 \times 9H) / 100 \quad 1$$

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

O teor de hidrogênio considerado nas estimativas foi de 6,4%, pois, tanto para os resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, quanto para a madeira de *Eucalyptus* são relatados na literatura o valor supracitado (GIL et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2012, 2013, 2014).

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

$$PCL = PCI \times \left[\left(\frac{100 - U_{bu}}{100} \right) \right] - (6 \times U_{bu}) \quad 2$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹) e U_{bu} é a umidade média do lote na base úmida (%).

Dessa forma, foi possível calcular as densidades energéticas unitárias dos *pellets*, produto da densidade aparente unitária e dos poderes caloríficos médios (PCS, PCI e PCL); bem como as densidades energéticas do granel, produto da densidade a granel e dos poderes caloríficos médios (PCS, PCI e PCL).

Para a determinação das densidades energéticas das biomassas *in natura* e das misturas foram considerados os mesmos valores para os poderes caloríficos superior e inferior dos *pellets*, pois são obtidos em base seca. Procedimento semelhante foi adotado por Protásio et al. (2011),

TABELA 1 - *Pellets* produzidos.

Sigla	Biomassa (s) lignocelulósica (s)	Composição
PCC	Casca de café	100% de casca de café
PPP	Película prateada	100% de película prateada
PCP	Casca de café e película prateada	50% de casca de café e 50% de película
PCE	Casca de café e madeira de eucalipto	70% de casca de café e 30% de madeira de eucalipto
PPE	Película prateada e madeira de eucalipto	70% de película prateada e 30% de madeira de eucalipto

para briquetes de resíduos lignocelulósicos. Já o poder calorífico útil foi estimado, utilizando-se o mesmo procedimento adotado para os *pellets* e descrito anteriormente.

A taxa de compactação foi calculada, dividindo-se a densidade a granel dos *pellets*, pela densidade a granel das biomassas *in natura* ou das misturas realizadas.

Propriedades químicas dos *pellets*

Foi realizada a análise química imediata dos *pellets* produzidos, visando à determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo, conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (ASTM, 2007). Esse ensaio foi realizado em triplicata.

Propriedades mecânicas dos *pellets*

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos (partículas menores que 3,15 mm) foram determinadas, utilizando-se o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010b).

Avaliou-se a resistência à compressão diametral dos *pellets* (Equação 3), de forma semelhante à realizada por Cubero-Abarca et al. (2014), sendo que, vinte e cinco *pellets* foram amostrados aleatoriamente e mantidos em câmara climatizada até massa constante. O ensaio foi realizado com velocidade de 5 mm/s na Máquina de Ensaio Universal Arotec, Modelo WDW 20e, utilizando-se uma célula de carga com capacidade para 2 toneladas.

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

Análise estatística dos dados

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com dez tratamentos, ou seja, cinco tipos de *pellets* e cinco biomassas *in natura* e, três repetições, para a análise dos dados de

densidade a granel, densidades energéticas do granel e umidades (bases seca e úmida).

Para as demais propriedades avaliadas nos *pellets* foi considerado um delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos (cinco tipos de *pellets* – Tabela 1) e diferentes números de repetições por variável resposta analisada, visando o controle do erro experimental (Tabela 2), pois cada propriedade é obtida por meio de métodos laboratoriais específicos.

Para a comparação múltipla das médias em todas as situações, utilizou-se o teste Scott-Knott, a 5% de significância. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do *software* R (R Core Team, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas e energéticas dos *Pellets* e biomassas

A umidade do material (Tabela 3) é um índice primordial, quando se avaliam os materiais lignocelulósicos como fonte de bioenergia, pois, quanto maior a quantidade de água presente no combustível, menor será o seu valor calórico.

Observa-se que, na média as biomassas *in natura* apresentaram 11,2% de umidade na base seca e os *pellets* 10,6%. Dessa forma, constata-se que o processo de peletização da biomassa resultou em uma diminuição na umidade do combustível, pois durante a densificação ocorre o atrito entre a matriz da peletizadora e a biomassa, o que proporciona um aumento na temperatura e, conseqüentemente, parte da água contida no material é liberada, na forma de vapor de água.

A norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), estabelece que os *pellets* do tipo A, oriundos de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas, apresentem valores menores que 12%, para umidade na base úmida e inferiores a 13,6%, para a umidade na base seca. Portanto, os biocombustíveis sólidos avaliados atenderam à referida norma e nesse requisito poderiam ser comercializados nos países da União Europeia.

TABELA 2 - Número de repetições considerados para cada propriedade.

Propriedade	Número de repetições
Densidades unitárias (aparente e energética)	100
Comprimento e diâmetro	100
Poderes caloríficos e composição química imediata	3
Durabilidade mecânica e teor de finos	5
Compressão diametral	25

TABELA 3 - Densidade a granel, taxa de compactação, umidade base seca e umidade na base úmida, para as biomassas e os *pellets*.

Combustíveis	Ubs (%)	Ubu (%)	DG (kg/m ³)	TC
Película prateada <i>in natura</i>	12,68 E	11,25 E	118,0 A	-
Mix de casca de café e película prateada <i>in natura</i>	10,28 B	9,32 B	159,9 B	-
Casca de café <i>in natura</i>	9,50 A	8,68 A	171,6 C	-
Mix de película prateada e madeira <i>in natura</i>	11,32 C	10,17 C	182,9 D	-
Mix de casca de café e madeira <i>in natura</i>	12,10 D	10,87 D	198,4 E	-
PCE - <i>Pellet</i> de casca de café e madeira	9,80 A	8,93 A	702,7 F	3,54
PCC - <i>Pellet</i> de casca de café	10,68 B	9,65 B	708,9 G	4,13
PPE - <i>Pellet</i> de película prateada e madeira	11,53 C	10,34 C	728,7 H	3,98
PCP - <i>Pellet</i> de casca de café e película prateada	9,87 A	8,98 A	742,5 I	4,64
PPP - <i>Pellet</i> de película prateada	11,20 C	10,07 C	755,6 J	6,40
CVe (%)	2,45	2,25	0,62	-

Ubs: Umidade na base seca; Ubu: Umidade na base úmida; DG: Densidade a granel; TC: Taxa de compactação; CVe: coeficiente de variação experimental. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Em relação à densidade a granel da biomassa (Tabela 3), observa-se que, para a película prateada foi encontrado o menor valor médio (118 kg m⁻³). Em contrapartida, os *pellets* produzidos com essa biomassa lignocelulósica apresentaram a maior taxa de compactação e, conseqüentemente, a maior densidade a granel (755,6 kg m⁻³), proporcionando um aumento de 540% nessa propriedade. Segundo Protásio et al. (2011), quanto menor a densidade a granel da biomassa, maior será o aumento percentual da sua densidade após a compactação e melhor será a acomodação das partículas, corroborando com os resultados encontrados.

Todos os *pellets* produzidos apresentaram densidade a granel superior a 700 kg m⁻³ e, dessa forma, atenderam à norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), que estabelece valor mínimo de 600 kg m⁻³. Os resultados encontrados foram superiores aos relatados por Liu et al. (2013), trabalhando com *pellets* de mix de bambu com palha de arroz na China, que relataram valor médio de 590 kg m⁻³. Com base nas informações obtidas na literatura supracitada e na norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), pode-se constatar a potencialidade tecnológica de produção de biocombustíveis sólidos granulados, a partir dos resíduos da cafeicultura.

A densificação proporcionada pelo processo de peletização proporcionou aumento significativo da densidade energética dos *pellets* comparativamente à biomassa *in natura* (Figura 1). Após a densificação, os *pellets* de casca de café e madeira (PCE), de película prateada e madeira (PPE), casca de café (PCC), de casca de café e película prateada (PCP) e, de película prateada (PPP), apresentaram um aumento de: 262, 297, 307, 366 e 551%, respectivamente, na densidade energética líquida. Protásio et al. (2011), avaliando briquetes de casca de café encontraram um aumento de 179% na densidade energética, e Liu, Quek e Balasubramanian (2014) relataram um aumento de 295% para *pellets* de casca de arroz, em relação à biomassa *in natura*.

Garcia, Caraschi e Ventrone (2013), avaliando *pellets* comerciais de três estados brasileiros encontraram densidade energética inferior média de 11,12 GJ m⁻³, ou seja, 20% menor, comparativamente ao encontrado no presente trabalho para *pellets* de película prateada (PPP). Portanto, o processo de peletização viabiliza a utilização energética, doméstica ou industrial, dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura, uma vez que o grande benefício é o aumento da quantidade de energia por unidade de volume, conforme discutido anteriormente.

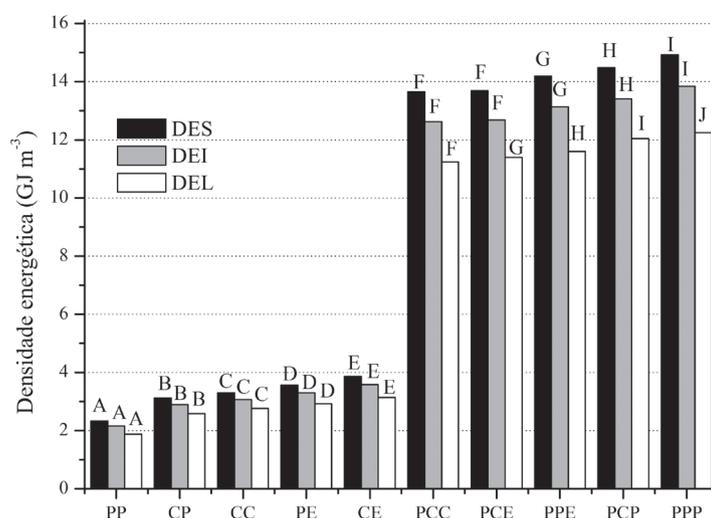
Os resultados obtidos para densidade unitária evidenciam que os *pellets* de casca de café e madeira (PCE) apresentaram os menores valores e isso influenciou as densidades energéticas unitárias (superior e inferior), encontradas (Tabela 4). Já para a densidade energética unitária líquida, os *pellets* de casca de café com madeira de eucalipto (PCE), *pellets* de película prateada com madeira de eucalipto (PPE) e *pellets* de casca de café (PCC) apresentaram valores estatisticamente iguais (Tabela 4). Esses resultados podem ser explicados em função da umidade (Tabela 3) e do valor calórico dos *pellets* (Tabela 5).

Soares et al. (2014) encontraram densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com 84 meses de idade, de 540 kg m^{-3} . Dessa forma, os *pellets* de película prateada apresentaram densidade unitária 131% maior do que a madeira de eucalipto relatada na literatura. Cabe ressaltar que as diferentes espécies, clones e procedências do gênero *Eucalyptus* são amplamente utilizadas no Brasil, para a finalidade energética. Tal fato pode contribuir para a viabilização econômica da utilização de *pellets* no Brasil, na medida em que torna possível o transporte a maiores distâncias e otimiza o espaço em locais de armazenamento.

Os *pellets* apresentaram dimensões esperadas, pois a peletizadora contém em sua estrutura uma matriz perfurada de 6 mm de diâmetro (Tabela 4). O comprimento médio obtido por meio da medição longitudinal dos *pellets* variou de 14,85 a 16,18 mm. Segundo Mahapatra et al. (2010), a alteração dos diâmetros dos *pellets* pode ser explicada pela migração de vapor de água do centro para a superfície, preenchendo espaços vazios, e isso interrompe as ligações formadas durante a peletização.

O diâmetro e comprimento dos *pellets* produzidos atenderam às exigências estabelecidas pela norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), classificando-se como *pellets* do tipo A, apresentando diâmetro dentro da faixa de $6 \pm 1 \text{ mm}$ e comprimento de 3,15 a 40 mm. Segundo Liu et al. (2013), *pellets* com diâmetros menores permitem uma combustão mais uniforme, comparativamente aos *pellets* de maiores diâmetros, principalmente em pequenos fornos.

Quanto às densidades energéticas unitárias (superior, inferior e líquida), observa-se efeito significativo dos tipos de *pellets* (Tabela 4). Liu, Quek e Balasubramanian (2014) encontraram, para *pellets* de fibra de coco, $17,36 \text{ GJ m}^{-3}$ para densidade energética unitária superior, resultado inferior ao exposto neste trabalho para os *pellets* de película prateada ($24,65 \text{ GJ m}^{-3}$).



DES: densidade energética superior; DEI: densidade energética inferior; DEL: densidade energética líquida; PP: película prateada; CP: casca de café e película prateada; CC: casca de café; PE: película prateada e madeira; CE: casca de café e madeira; PCC: *pellet* de casca de café; PCE: *pellet* de casca de café e madeira; PPE: *pellet* de película prateada e madeira; PCP: *pellet* de casca de café e película prateada; PPP: *pellet* de película prateada. Médias seguidas de mesma letra não apresentaram diferença estatística, à 5 % de significância, pelo teste Scott-Knott; Coeficiente de variação experimental: 0,62 %.

FIGURA 1 - Densidade energética dos combustíveis analisados.

TABELA 4 - Comprimento, diâmetro, densidade unitária e densidades energéticas unitárias dos *pellets* avaliados

<i>Pellets</i>	C (mm)	D (mm)	DU (kg m ⁻³)	DES (GJ m ⁻³)	DEI (GJ m ⁻³)	DEL (GJ m ⁻³)
PCE	14,85 A	6,10 A	1.150 A	22,42 A	20,77 A	18,65 A
PPE	16,18 B	6,17 C	1.180 B	23,02 B	21,32 B	18,81 A
PCC	16,10 B	6,14 B	1.190 B	23,01 B	21,29 B	18,95 A
PCP	15,33 A	6,15 B	1.230 C	23,95 C	22,18 C	19,91 B
PPP	14,93 A	6,15 B	1.250 D	24,65 D	22,85 D	20,24 C
CVe (%)	12,45	0,92	4,38	4,37	4,37	4,38

PCE: *pellet* de casca de café e madeira de eucalipto; PPE: *pellet* de película prateada e madeira de eucalipto; PCC: *pellet* de casca de café; PCP: *pellet* de casca de café e película prateada; PPP: *pellet* de película prateada; C: comprimento; D: diâmetro; DU: densidade unitária; DES: densidade energética unitária superior; DEI: densidade energética unitária inferior; DEL: densidade energética unitária líquida; CVe: coeficiente de variação experimental. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

TABELA 5 - Poderes caloríficos (superior, inferior e líquido) dos *pellets* analisados

<i>Pellets</i>	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCL (MJ/kg)
PCC	19,26 A	17,81 A	15,84 A
PPE	19,47 B	18,03 B	15,89 A
PCP	19,50 B	18,06 B	16,19 B
PPP	19,75 C	18,31 C	16,19 B
PCE	19,48 B	18,04 B	16,74 C
CVe (%)	0,54	0,58	0,85

PCC: *pellet* de casca de café; PPE: *pellet* de película prateada e madeira de eucalipto; PCP: *pellet* de casca de café e película prateada; PPP: *pellet* de película prateada; PCE: *pellet* de casca de café e madeira de eucalipto; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCL: poder calorífico líquido; CVe: coeficiente de variação experimental. Médias na coluna seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Leite et al. (2015a) avaliaram a madeira de *Coffea arabica* L., cultivada no sistema convencional, e encontraram o valor médio para densidade energética unitária inferior de, 12,52 GJ m⁻³, ou seja, 45% menor que a densidade energética unitária inferior, encontrada no presente trabalho para *pellets* de película prateada (PPP).

Os *pellets* de película prateada (PPP) se destacaram ainda por apresentarem maiores poderes caloríficos superior e inferior (Tabela 5).

Já para o poder calorífico líquido, os *pellets* de casca de café e madeira (PCE) apresentaram o maior valor médio, sendo superior ao encontrado por Cubero-Abarca et al. (2014), de 11,59 MJ/kg, em seu trabalho com *pellets* de polpa de café.

Os *pellets* de película prateada (PPP) apresentaram elevado teor de cinzas, baixo teor de materiais voláteis (Tabela 6) e alto poder calorífico superior, comparativamente aos demais (Tabela 5). Logo, estas diferenças no valor calórico superior podem estar relacionadas com a composição química elementar das biomassas lignocelulósicas avaliadas.

Os *pellets* apresentaram poder calorífico líquido, em conformidade com o mínimo estabelecido pela norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a) de 14,1 MJ/kg e foram classificados como *pellets* do tipo A.

TABELA 6 - Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos *pellets*

<i>Pellets</i>	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	MV/CF
PCC	77,14C	3,39A	19,47 A	3,96
PPP	72,07A	9,90E	18,03 A	4,00
PCP	73,82B	7,28C	18,90 A	3,91
PCE	77,44C	3,94B	18,62 A	4,16
PPE	71,91A	8,76D	19,33 A	3,72
CVe (%)	0,88	1,73	3,33	-

MV, CZ e CF: teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; PCC: *pellet* de casca de café; PPP: *pellet* de película prateada; PCP: *pellet* de casca de café e película prateada; PCE: *pellet* de casca de café e madeira de eucalipto; PPE: *pellet* de película prateada e madeira de eucalipto; CVe: coeficiente de variação experimental. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Scott-Knott.

Propriedades químicas dos *pellets*

Os *pellets* produzidos com casca de café (PCC) e casca de café com madeira de eucalipto (PCE) apresentaram os maiores teores de materiais voláteis (Tabela 6). Observou-se similaridade com outros estudos, em que Gil et al. (2010) encontraram 79,4% e Leite et al. (2015a) 80,39% para o teor de materiais voláteis de *pellets* de casca de café e para a madeira do cafeeiro, respectivamente.

A emissão rápida de materiais voláteis e maior relação MV/CF, são fatores que contribuem, decisivamente, para acelerar a ignição do combustível, em uma temperatura inferior (MOON et al., 2013; PODDAR et al., 2014). Dessa forma, espera-se que os *pellets* estudados apresentem comportamento semelhante nas etapas iniciais da combustão, pois a relação MV/CF encontrada, apresentou baixa variação, de aproximadamente 10%.

Em relação ao teor de cinzas, pode-se observar que os *pellets* de película prateada (PPP), apresentaram o maior valor (9,90%), conseqüentemente, todos os *pellets* produzidos com película prateada apresentaram elevados teores de cinzas. Para os *pellets* produzidos com a casca do café (PCC) e casca de café com madeira de eucalipto (PCE), foram observados teores de cinzas de 3,39% e 3,94%, respectivamente. Esses valores são inferiores aos encontrados por Gil et al. (2010) e Protásio et al. (2013), para a casca de café de 4,5 e 4,9%, respectivamente.

Ward, Zhongsheng e Gurba (2008) relataram teores de cinzas de até 21,4% em amostras de carvão mineral, ou seja, consideravelmente superiores aos

resultados encontrados para os *pellets* oriundos de resíduos da cafeicultura e madeira de eucalipto. Cabe ressaltar que o carvão mineral é amplamente utilizado em países do hemisfério norte, para a geração de calor e eletricidade.

Dessa forma, o resultado encontrado pode ser considerado vantajoso, quando comparados ao carvão mineral, pois os minerais influenciam significativamente o desempenho dos combustíveis durante a combustão e contribuem para a corrosão dos equipamentos utilizados, como caldeiras, fornos, fornalhas, fogões domésticos e gaseificadores e ocasionam a necessidade de manutenção periódica (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013; CARROLL; FINNAN, 2012; PODDAR et al., 2014).

Os biocombustíveis sólidos produzidos com a casca de café e a partir da mistura com a madeira de eucalipto atenderam à norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a) e foram classificados como *pellets* do tipo A, pois apresentaram teores de cinzas inferiores a 5%. Já os demais *pellets* avaliados, com teores de cinzas inferiores a 10%, foram classificados como do tipo B.

Não foi observado efeito significativo do tipo de *pellets* para o teor de carbono fixo, sendo que o valor médio encontrado foi semelhante ao relatado por Protásio et al. (2013), para a casca de café (18,6%).

Propriedades mecânicas dos *pellets*

A compressão diametral, variou entre 1,92 a 3,24 MPa, sendo que os *pellets* de casca de café (PCC) apresentaram o maior valor (Tabela 7).

TABELA 7 - Ensaio mecânicos realizados nos *pellets*

<i>Pellets</i>	Compressão diametral (MPa)	Finos (%)	Durabilidade (%)
PCC	3,24C	0,18A	94,51B
PPP	2,51B	0,11A	97,60B
PCP	2,20A	0,26A	96,32B
PCE	1,92 A	0,19A	98,07B
PPE	2,05A	2,62 B	61,23A
CVe (%)	26,15	51,49	2,61

PCC: *pellet* de casca de café; PPP: *pellet* de película prateada; PCP: *pellet* de casca de café e película prateada; PCE: *pellet* de casca de café e madeira de eucalipto; PPE: *pellet* de película prateada e madeira de eucalipto; CVe: coeficiente de variação experimental. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 5 % de significância, pelo teste Scott-Knott.

Cubero-Abarca et al. (2014), avaliaram *pellets* de polpa de café e encontraram 3,28 MPa para resistência à compressão diametral. De acordo com os mesmos autores, uma das prováveis explicações para as diferenças nas propriedades mecânicas dos *pellets* é a agregação das diferentes partículas, durante o processo de peletização.

Em relação ao teor de finos, que está diretamente relacionado com a durabilidade dos biocombustíveis sólidos, todos os *pellets* se enquadraram na norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a). Os *pellets* de película prateada com madeira de eucalipto (PPE) diferiram estatisticamente dos demais, apresentando 2,62% de finos, se classificando como *pellets* do tipo B, pois o estabelecido pela norma de classificação são valores inferiores ou iguais a 3%, enquanto que os outros *pellets* se enquadraram como *pellets* do tipo A (valores inferiores ou iguais a 2% de finos).

Quanto à durabilidade, os *pellets* de película prateada com madeira de eucalipto (PPE) diferiram estatisticamente dos demais biocombustíveis sólidos produzidos, e não atenderam ao requisito mínimo da norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), que exige como classificação, para *pellets* do tipo B, valores de durabilidade superior ou igual a 96%. Para solucionar esse problema, recomenda-se a diminuição da quantidade de madeira de eucalipto adicionada à película prateada ou alteração de variáveis de produção, como pressão e temperatura de prensagem.

Os demais *pellets* avaliados formaram um único grupo para a durabilidade mecânica, com média geral de 96,6%. *Pellets* com baixa durabilidade, desintegram-se com facilidade durante o transporte e armazenamento, apresentando maiores percentagens de finos, o

que acarreta problemas na gestão e uso desses combustíveis, inviabilizando a comercialização.

Com base nos resultados encontrados e discutidos anteriormente, pode-se afirmar que a produção de biocombustíveis sólidos granulados pode se tornar uma alternativa de diversificação na produção de café e uma nova forma de ganho financeiro para o cafeicultor. Os *pellets* avaliados, com exceção daqueles produzidos com película prateada e madeira de eucalipto, podem ser considerados aptos para serem comercializados e exportados para a União Europeia. Isso poderá destacar o Brasil no cenário internacional como exportador de energia renovável e ambientalmente limpa por meio da densificação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura.

4 CONCLUSÕES

Os resíduos do processamento dos grãos de café podem ser transformados em biocombustíveis sólidos granulados para a geração de energia térmica ou calorífica, bem como bioeletricidade.

Os *pellets* de casca de café (PCC), película prateada (PPP), casca de café com película prateada (PCP) e casca de café com madeira de eucalipto (PCE) podem ser comercializados e exportados para a União Europeia, seguindo as exigências da norma DIN EN 14961-6, para classificação de *pellets* oriundos de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas.

Os *pellets* de película prateada com madeira de eucalipto (PPE) não se enquadraram no quesito durabilidade mecânica da norma DIN EN 14961-6.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado do segundo autor (processo 141439/2014-9); à FAPEG, pelo financiamento do projeto de pesquisa (processo 201210267000887 e chamada 005/2012); à empresa ENG-MAQ Equipamentos LTDA, pela ajuda na manutenção da peletizadora utilizada; ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pelo auxílio nas análises.

6 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2 p.
- _____. **ASTM E711-87**: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8 p.
- BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, Washington, v. 42, p. 169-174, 2013.
- CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, London, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.
- CASTELLANO, J. M. et al. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Fuel**, London, v. 139, p. 629-636, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café**, v. 1, n. 3, primeiro levantamento, janeiro/2015. Brasília, 2015. 41 p.
- CUBERO-ABARCA, R. et al. Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 461-470, set./out. 2014.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 14774-1**: determination of moisture content: oven dry method: part 1, total moisture: reference method. Berlin: CEN, 2010a. 10 p.
- _____. **DIN EN 14961-6**: solid biofuels: fuel specifications and classes: part 6, non-woody pellets for non-industrial use. Berlin: CEN, 2012a. 16 p.
- _____. **DIN EN 15210-1**: solid biofuels: determination of mechanical durability of pellets and briquettes: part 1, pellets. Berlin: CEN, 2010b. 12 p.
- _____. **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 pèletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: EMBRAPA Agroenergia, 2012. 130 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014. 288 p.
- 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.
- GARCIA-MARAVÉ, A. et al. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 129, p. 1-7, 2015.
- GIL, M. V. et al. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n. 22, p. 8859-8867, 2010.
- LEITE, E. R. S. et al. Avaliação da qualidade da madeira de *Coffea arabica* L. como fonte de bioenergia. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 541-549, 2014.
- _____. Estudo tecnológico da madeira de *Coffea arabica* L. visando à combustão completa e pirólise. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 158-168, 2015a.
- _____. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015b.
- LIU, Z. et al. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, Oxford, v. 55, p. 1-5, 2013.

- LIU, Z.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, London, v. 113, p. 1315-1322, 2014.
- MAHAPATRA, A. et al. Effects of moisture change on the physical and thermal properties of sericea lespedeza pellets. **International Agricultural Engineering Journal**, Bangkok, v. 19, n. 3, p. 23-29, 2010.
- MIRANDA, T. et al. Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 103, p. 91-96, 2012.
- MOON, C. et al. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Rome, v. 47, p. 232-240, 2013.
- PAULA, L. E. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011a.
- _____. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011b.
- PODDAR, S. et al. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: higher heating value. **Fuel**, London, v. 131, p. 43-48, 2014.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 1166-1185, 2013.
- _____. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113-127, 2014.
- _____. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.
- _____. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 27 maio 2015.
- SAENGER, M. et al. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 103-121, 2001.
- SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.
- THEERARATTANANOON, K. et al. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. **Industrial Crops and Products**, Washington, v. 33, n. 2, p. 325-332, 2011.
- WARD, C. R.; ZHONGSHENG, L.; GURBA, L. W. Comparison of elemental composition of macerals determined by electron microprobe to whole-coal ultimate analysis data. **International Journal of Coal Geology**, Amsterdam, v. 75, p. 157-165, 2008.