

Recebido: 14-04-2017 Aceito: 15-09-2017 Publicado: 05-02-2017

Qualidade dos *pellets* de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225

Dorival Pinheiro Garcia^{1*}, José Cláudio Caraschi², Gustavo Ventorim², Glaucia Aparecida Prates²,
Thiago De Paula Protásio³

¹ Departamento de Tecnologia da Madeira, Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, Itapeva – SP, Brasil.

² Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista, Itapeva – SP, Brasil.

³ Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, Brasil

RESUMO Os *pellets* são biocombustíveis sólidos densificados negociados internacionalmente. O Brasil é apontado como um futuro exportador desse produto. Para isso, precisa atender rígidos padrões de qualidades exigidos pela norma ISO 17225. No entanto, poucos estudos abordam a qualidade dos *pellets* em relação aos parâmetros dessa normativa internacional de 2014. Este trabalho analisou as características físicas, químicas e térmicas de três tipos de *pellets* produzidos no Brasil, classificando e comparando-os com os requerimentos dessa normativa europeia. Os *pellets* de pinus, madeira nativa e bagaço de cana foram examinados por um laboratório europeu especializado nesses biocombustíveis sólidos. Os resultados mostraram que o teor de cinzas é a principal característica qualitativa negativa desses produtos. Em relação à norma, somente os *pellets* de pinus atenderam todos os critérios de qualidade e alcançaram padrão A1 *Premium*, podendo ser utilizado em aplicações nobres como o aquecimento residencial.

Palavras-chave: combustível sólido; bioenergia; peletização; densificação; biocombustível.

Quality of Brazilian biomass pellets for residential heating: standards of ISO 17225

ABSTRACT Pellets are densified biofuels, internationally traded. Brazil is considered the future exporter of this product. In order for all of this to occur, it has to meet the strict quality standards required by ISO 17225. However, there are very few studies addressing the qualifications within the international standard guidelines of 2014. This work goes in depth analyzing the physical, chemical and thermal characteristics of three types of pellets produced in Brazil, classifying and comparing them according to the European standard requirements. Pellets made from pine, native wood and cane residues were examined by a European laboratory specialized in these solid biofuels. The results revealed that the ash was the only negative characteristic of these products. In relation to the standard, only the pellets made of pines fulfilled all the criteria, reaching the A1 Premium standard, with the ability of being used in noble operations such as the residential heating system.

Keywords: solid fuel; bioenergy; pelletizing; densification; biofuel.

Introdução

Durante os últimos cinco anos, os *pellets* se transformaram em um importante recurso energético mundial, especialmente para o continente europeu, onde seu mercado é estável e passa por rápido desenvolvimento (GARCIA et al., 2016).

Por ser um combustível renovável e menos poluente que os derivados do petróleo, os *pellets* são utilizados por países que precisam diminuir suas emissões poluentes para atender aos acordos firmados no Protocolo de Kyoto e ratificados na Conferência do Clima (COP21), que ocorreu na França, em dezembro de 2015 (ADAMS; LINDEGAARD, 2016).

O consumo de *pellets* pelos europeus foi de 9,2 e 14,4 milhões de toneladas em 2009 e 2011, respectivamente (TOSCANO et al., 2014) e espera-se um consumo de 50,0 milhões de toneladas para 2020 (BISWAS et al., 2011). Para esses autores, os *pellets* se tornarão um dos principais produtos de biomassa sólida comercializados globalmente e o Brasil pode ser um importante exportador.

O Brasil produziu 49.390 e 75.000 toneladas em 2014 e 2015, respectivamente (GARCIA et al., 2016; 2017), mas tem capacidade produtiva instalada para produzir quatro vezes mais, além dos novos projetos que estão sendo anunciados para os próximos anos (GARCIA et al., 2016). Diante desse novo cenário que se apresenta para os *pellets*, é importante que as empresas atestem a qualidade de seus produtos para alcançar o mercado de exportação.

Não há norma brasileira que regule a qualidade dos *pellets*, mas muitos países europeus (Itália, Alemanha, Áustria e Suécia) desenvolveram seus próprios padrões de qualidade para a combustão, armazenamento e transporte desses biocombustíveis. Há três anos, com objetivo de unificar a certificação nestes mercados, lançou-se o conjunto de normas internacionais ISO 17225 (2014), partes de 1 a 8. Essa nova legislação fornece os padrões de qualidade limites para os produtos densificados (*pellets*, briquetes industrial e não industrial) produzidos por qualquer biomassa vegetal.

Os critérios estabelecidos nessa norma europeia exigem redução das emissões de gases do efeito estufa, elementos minerais e de metais pesados, visto que os *pellets* são utilizados principalmente em sistemas de aquecimento residencial e comercial (JAGUSTYN et al., 2016).

Os teores de cinzas dos *pellets*, na norma ISO 17225 (2014), são uns dos principais fatores analisados porque influenciam diretamente na combustão, causam baixa eficiência do queimador, incrustações, corrosões e, consequentemente,

aumentam as despesas com manutenção do equipamento (GARCÍA et al., 2015). Por isso, os *pellets* são classificados em comerciais (A1, A2, B), industriais (I1, I2, I3) e não-lenhosos (A, B) de acordo com o seu teor de cinzas (ISO 17225, 2014).

Alguns artigos abordando a qualidade dos *pellets* brasileiros foram publicados recentemente (FARIA et al., 2016; PINTO et al., 2015; PROTÁSIO et al., 2015; SPANHOL et al., 2015), mas eles estão fundamentados nas normas individuais de cada país. Assim, ainda há uma lacuna do conhecimento em relação aos padrões normativos mais recente da ISO 17225 (2014). Logo, o objetivo deste trabalho foi classificar e comparar a qualidade dos *pellets* de pinus, *pellets* de madeira nativa e *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar em relação a esses novos padrões internacionais.

Material e Métodos

Três tipos de *pellets* que já foram produzidos no Brasil são analisados: *pellets* de madeira de pinus, madeira nativa e bagaço de cana (Figura 1). Os pacotes com 15 kg de *pellets* de pinus foram fabricados com serragem de pinus (*Pinus* sp.), em uma indústria de *pellets* localizada no Estado de Santa Catarina. Os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foram fabricados em uma indústria de *pellets* no interior de São Paulo, com o bagaço gerado por uma indústria de açúcar e álcool da cidade de Itai/SP. Já os *pellets* de madeira nativa foram produzidos em uma peletizadora (300 kg/h) na cidade de Belém/PA, com serragem de ipê (*Tabebuia* spp), provenientes de uma serraria no município de Parauapebas/PA.

As amostras de *pellets* foram produzidas e coletadas entre os meses de maio a outubro de 2015, acondicionadas em embalagens plásticas e enviadas para um laboratório europeu, credenciado para realizar as análises de qualidade dos *pellets* de acordo com as especificações da norma ISO 17225 (2014).



Pellets pinus

Pellets madeira nativa

Pellets bagaço de cana

Figura 1. Os três tipos de *pellets* utilizados nas análises**Figure 1.** The three types of *pellets* used in the analysis**Tabela 1.** Especificações de qualidade exigidos para os *pellets*, segundo a norma ISO 17225**Table 1.** Quality specifications required for biofuel *pellets*, according to ISO 17225

Norma Internacional ISO 17225-1		Referência para os ensaios	Pellets de madeira ISO 17225-2		Pellets não-lenhoso ISO 17225-6
Propriedades	Unid.		Residencial A1	Comercial A2	Geral A
		Aplicações Classificação			
Diâmetro	mm	ISO 17829 (2015)	6,0 - 8,0 ±1		6,0 - 10,0
Comprimento	mm	ISO 17829 (2015)	3,15 - 40,0		3,15 - 40,0
Densidade granel	Kg m ⁻³	ISO 17828 (2015)	≥ 600,0	≥ 600,0	≥ 600,0
Teor de umidade	%	ISO 18134 (2015)	≤ 10,0	≤ 10,0	≤ 12,0
Teor de cinzas	%	ISO 18122 (2015)	≤ 0,70	≤ 1,20	≤ 6,00
Poder cal. (PCI)	MJ kg ⁻¹	ISO 18125 (2015)	≥ 16,5	≥ 16,5	≥ 14,1
Densidade energ.	GJ m ⁻³	PCI x D _g	no	no	no
Enxofre	%	ISO 16994 (2016)	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,20
Carbono	%	ISO 16948 (2015)	no	no	no
Hidrogênio	%	ISO 16948 (2015)	no	no	no
Oxigênio	%	Por diferença	no	no	no
Nitrogênio	%	ISO 16948 (2015)	≤ 0,30	≤ 0,50	≤ 1,50
Cloro	%	ISO 16994 (2016)	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,20
Cádmio	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 0,50	≤ 0,50	≤ 0,50
Crômio	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 10,0	≤ 15,0	≤ 50,0
Cobre	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 10,0	≤ 20,0	≤ 20,0
Mercúrio	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,10
Chumbo	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 10,0	≤ 20,0	≤ 10,0
Zinco	mg kg ⁻¹	ISO 16968 (2015)	≤ 100,0	≤ 200,0	≤ 100,0
Durabilidade mecânica	%	ISO 17831 (2015)	≥ 98,0	≥ 97,5	≥ 97,5
Fusibilidade	°C	EN 15370-1 (2006)	≥ 1200	≥ 1100	≥ 1100

no= parâmetros não obrigatórios; PCI=poder calorífico inferior; D_g=densidade a granel

Essas especificações e parâmetros físicos, químicos e térmicos dos *pellets* são apresentados na Tabela 1, bem como a norma de referência para a execução de cada ensaio, como determinado nas partes 2 e 6 (ISO 17225, 2014), para a madeira e material não-lenhoso, respectivamente.

Embora não sejam obrigatórios para certificação da qualidade, densidade energética, teores de carbono, hidrogênio e oxigênio são importantes na utilização dos *pellets* e por isso foram determinados.

Uma limitação desse estudo está no fato do laboratório credenciado apresentar um relatório com os resultados médios, o que impossibilita a realização de estudos estatísticos de variabilidade dos dados. Entretanto, a confiabilidade dos resultados é garantida por ser laboratório comercial credenciado e especializado nas análises neste padrão normativo, possuir todos os equipamentos necessários e repetir o processo constantemente, conforme as orientações de certificação descritas na norma ISO 17225 (2014).

Resultados e Discussão

Os resultados das análises efetuadas, de acordo com essa norma europeia, são apresentados na Tabela 2.

Os diâmetros das amostras de *pellets* variaram entre 6,0-6,1 mm, semelhantes aos valores encontrados por Alakangas (2005) e Duca et al. (2014). Esses autores destacaram que os diâmetros finais tiveram pequenas variações porque foram produzidos com uma matriz perfurada com diâmetro padronizado de 6,0 mm e as oscilações representam apenas pequenos desgastes no canal ou adsorção de umidade do ambiente. Os valores atendem as exigências da norma ISO 17225 (2014) e o diâmetro uniforme é um fator importante na combustão porque proporcionam estabilidade na queima do biocombustível, sobretudo em pequenos queimadores residenciais (NADIAH; ABD 2016).

Quanto ao comprimento, os três *pellets* apresentaram valores superiores às referências listadas na Tabela 2. No entanto, esses tamanhos atendem aos requisitos normativos porque se encontram abaixo do limite máximo especificado que é de 40,0 mm. Em aplicações de pequeno porte, como aquecimento residencial, fornos de pizzarias, padarias e lavanderias, movidos à *pellets*, recomenda-se comprimentos menores que 20,0 mm, devido ao diâmetro da rosca sem fim, que pode ser obstruída causando a parada do equipamento e até a queima dos motores elétricos do sistema (TUMULURU, 2014).

Os valores para a densidade a granel, variaram entre 583,6 e 710,0 kg m⁻³ e estão coerentes com a literatura de referência (Tabela 2) e a norma ISO 17225 (2014). Alta densidade energética proporciona ganhos logísticos no transporte de energia porque é possível transportar maior massa de *pellets* em um menor volume de carga (FARIA et al., 2016; GARCIA et al., 2013; NADIAH; ABD, 2016; PEREIRA et al., 2016). Assim, os valores da densidade energética dos três tipos de *pellets* desse estudo são semelhantes a Alakangas (2005) e Duca et al. (2014), porém os *pellets* de pinus têm 36,96% e 35,59% mais energia por volume do que os *pellets* de madeira nativa e bagaço de cana, respectivamente. Portanto, há uma correlação direta entre densidade a granel e densidade energética, que na prática se traduzem em possibilitar o carregamento de mais energia no mesmo espaço do caminhão ou navio cargueiro, barateando o custo final do serviço de transporte e tornando esse biocombustível mais competitivo.

Os requisitos da norma ISO 17225 (2014) recomendam, para os *pellets* de madeira, umidades abaixo de 10%. Desta forma, os *pellets* de madeira nativa, não alcançaram os padrões normativos, apresentando valor superior à literatura apresentada na Tabela 2. A umidade do biocombustível influencia diretamente na quantidade de energia disponível após a combustão. Assim, quanto maior a umidade, maior a parte da

energia que será utilizada para a sua vaporização (SPANHOL et al., 2015). No entanto, ressalta-se que essa pequena variação da umidade (0,65% acima da norma) pode ser facilmente contornada com ajustes no processo de secagem da matéria-prima. Além disso, baixos teores de umidade nos *pellets* são necessários para se obter maior eficiência na combustão, além de prolongar o tempo de estocagem do produto, minimizando a proliferação de fungos e a deterioração do material (GARCIA et al., 2013).

O teor de cinzas é fundamental para a qualidade energética dos *pellets* porque elevados teores aumentam os custos de manutenção dos equipamentos queimadores e

contribuem para a redução do poder calorífico, uma vez que os elementos minerais, que compõem as cinzas, não participam do processo de combustão (PROTÁSIO et al., 2012).

Os *pellets* de pinus e de madeira nativa apresentaram teores de cinzas maiores do que Alakangas (2005) e menores do que Duca et al. (2014). A pequena diferença no teor de minerais desses dois *pellets* (0,17%), que podem estar associados à fatores como tipos de solo, espécie vegetal, local de plantio, absorção de nutrientes entre outras variáveis (Vassilev et al., 2010), é o suficiente para separá-los em diferentes classificações, de acordo com a norma ISO 17225

Tabela 2. Resultados das análises dos três *pellets* comerciais incluindo dados de duas referências da literatura

Table 2. Results of the analyzes of the three commercial *pellets* including data two references of the literature

Propriedades	Unid.	<i>Pellets</i> de madeira Pinus	<i>Pellets</i> de madeira nativa	<i>Pellets</i> de bagaço de cana	Referências	
					Alakangas (2005)	Duca et al. (2014)
Diâmetro	mm	6,10	6,10	6,00	6,0-8,0	6,10
Comprimento	mm	20,30	21,70	18,42	7,0-19,0	17,10
Densidade granel	Kg m ⁻³	710,0	583,6	608,8	560,0-690,0	696,5
Umidade base seca	%	6,10	10,65	7,27	5,20-9,70	6,70
Teor de cinzas	%	0,60	0,77	1,95	0,24-0,37	0,90
Poder cal. (PCI)	MJ kg ⁻¹	19,15	17,02	16,48	16,7-17,9	17,0
Densidade energ.	GJ m ⁻³	13,60	9,93	10,03	9,30-12,30	11,84
Enxofre	%	0,040	0,020	0,100	0,004-0,007	0,090 ¹
Carbono	%	51,82	52,44	50,64	49,12-49,80	52,80 ¹
Hidrogênio	%	6,14	6,25	6,08	6,03-6,13	6,10 ¹
Oxigênio	%	41,80	41,10	42,98	43,92-44,76	40,81 ¹
Nitrogênio	%	0,20	0,19	0,20	0,05-0,16	0,20 ¹
Cloro	%	0,01	0,03	0,03	0,06-0,07	0,01
Cádmio	mg kg ⁻¹	0,03	0,01	0,07	0,06-0,11	0,20
Crômio	mg kg ⁻¹	1,00	5,00	2,70	0,31-1,59	0,80
Cobre	mg kg ⁻¹	1,60	5,00	3,50	1,02-2,76	2,60
Mercúrio	mg kg ⁻¹	0,08	0,02	0,03	0,01-0,03	0,10
Chumbo	mg kg ⁻¹	2,10	4,00	0,70	0,6-14	1,60
Zinco	mg kg ⁻¹	5,60	7,90	9,60	7,04-8,0	10,90
Durabilidade mec.	%	98,6	97,7	97,5	97,4-98,9	98,0
Fusibilidade	°C	1306	1290	1255	1230-1290	1300 ²

Alakangas (2005), diversas espécies de madeiras; Duca et al. (2014), madeira de coníferas; ¹Vassilev et al. (2010), cavacos de pinus; ²Vassilev et al. (2014), cavacos de *beech wood* (Faia).

(2014): *pellets* de pinus, classificado como A1 *Premium* é recomendado para uso residencial; *pellets* de madeira nativa, classificado como A2 é indicado para uso geral, uma vez que pode ter até 1,2% de cinzas (Tabela 1).

Para os *pellets* não-lenhosos como o bagaço de cana, a norma ISO 17225-6 (2014), estabelece limites de até 6,0% de cinzas e poder calorífico inferior $\geq 14,1 \text{ MJ kg}^{-1}$, para os biocombustíveis classe A. Timung et al. (2015), analisaram o bagaço de cana e obtiveram 1,7% de cinzas e $17,2 \text{ MJ kg}^{-1}$, para o poder calorífico inferior. Esses valores estão próximos dos obtidos nesse estudo. Assim, esses *pellets* atenderam a exigência da referida normativa europeia e podem ser classificados como adequados para uso geral não-residencial.

Os teores de enxofre desse estudo foram superiores aos relatados por Alakangas (2005) e menores do que Vassilev et al. (2010), com exceção para os *pellets* de bagaço de cana que apresentaram resultados superiores a todos os autores citados na Tabela 2. No entanto, as três amostras de *pellets* estão em conformidade com a norma ISO 17225 (2014).

Quantificando-se os teores de nitrogênio e enxofre pode-se estimar o impacto ambiental associado à queima do material lignocelulósico, pois durante a combustão esses elementos são convertidos em óxidos NO_x e SO_x , respectivamente, que podem resultar em chuva ácida, corrosão dos fornos e caldeiras, acidificação de solos e danos à camada de ozônio (DEMIRBAS, 2004; CARROLL E FINNAN, 2012). A literatura especializada tem relatado baixas concentrações de nitrogênio e enxofre para a madeira e resíduos lignocelulósicos (PROTÁSIO et al., 2013b). Logo, as emissões de gases NO_x e SO_x , a partir da queima desses materiais, podem ser consideradas negligenciáveis. Assim, para o teor de nitrogênio, os *pellets* de pinus, madeira nativa e bagaço de cana apresentaram valores maiores que os obtidos por Alakangas (2005) e semelhantes aos de Vassilev

et al. (2010). Mas, ainda assim, estão em conformidade com os padrões estabelecidos na norma para esses materiais.

Os teores de cloro das amostras de *pellets* (Tabela 2) são menores do que os valores encontrados por Alakangas (2005) e semelhantes aos declarados por Duca et al. (2014). Assim, de acordo com a normativa europeia ISO 17225 (2014), os *pellets* de madeira nativa não estariam em conformidade por conterem teores de cloro 50% acima do permitido.

Alguns autores (AHMAD et al., 2016; MIRANDA et al., 2009) considerarem que os teores de enxofre, nitrogênio e cloro são tão pequenos que podem ser desprezados, na simplificação dos cálculos. Porém, outros pesquisadores (DUCA et al., 2014; JAGUSTYN et al., 2016; KIRSTEN et al., 2016) associam o cloro à problemas de corrosão nos equipamentos queimadores, e os teores de nitrogênio e enxofre ao aumento das emissões gasosas na queima dos *pellets*.

Os teores de carbono e hidrogênio (Tabela 2) são maiores do que Alakangas (2005), enquanto os teores de oxigênio, ao contrário, foram menores. Os resultados também são discordantes de Protásio et al. (2013a). As divergências dos resultados desse estudo com esses autores estão associados a diversos fatores como tipos de solo, espécie vegetal, local de plantio, entre outras variáveis, como foi detectado por Vassilev et al. (2010) nos seus estudos de revisão sobre a composição da biomassa vegetal.

Carbono, hidrogênio e oxigênio não têm limites estabelecidos na normativa europeia de qualidade, mas com essa composição química elementar do combustível é possível realizar cálculos ou simulações de combustão e desenvolver projetos de sistemas de conversão da biomassa vegetal em energia térmica (PROTÁSIO et al., 2013a). Por isso, é comum as análises laboratoriais trazerem os resultados em porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio. Além disso, Protásio et al. (2011) destacaram a existência de

correlações positivas (carbono e hidrogênio) e negativas (cinzas, oxigênio) com o poder calorífico dos *pellets*.

Traços de metais pesados como o cádmio, crômio, cobre, mercúrio, chumbo e zinco foram detectados nas amostras de *pellets* e, no geral, esses resultados são semelhantes à literatura de referência da Tabela 2. Embora existam algumas discrepâncias nesses valores, todos os tipos de *pellets* apresentaram resultados em conformidade com a norma ISO 17225 (2014). Baixos teores de metais pesados são importantes para a qualidade dos *pellets* porque são associados as emissões de particulados, influenciam o ponto de fusão das cinzas, reciclagem e a disposição das cinzas residuais (ACDA; DEVERA, 2014).

A durabilidade mecânica das três amostras de *pellets* estão entre 97,5-98,6% e são semelhantes às referências citadas na Tabela 2. A norma exige resultados maiores que 97,5% como parâmetro mínimo de qualidade para se obter a certificação para a exportação. Desta forma, os três *pellets* apresentaram-se em conformidade com os padrões da norma ISO 17225 (2014). Para Tumuluru (2014), a durabilidade mecânica dos *pellets* é um indicador de resistência à compressão e impactos durante a movimentação. Dessa maneira, pode-se inferir que os três produtos apresentaram alta resistência mecânica, sobretudo os *pellets* de pinus. Na prática, ao transportar e armazenar esses biocombustíveis sólidos, existe baixa possibilidade de gerar poeira e partículas finas, minimizando possíveis riscos de explosões nos compartimentos de carga.

O comportamento das cinzas à fusão (fusibilidade) indica a facilidade com que os materiais inorgânicos da biomassa vegetal se fundem. A baixa temperatura de fusão das cinzas residuais (< 1.100°C) é apontada por alguns autores (VASSILEV et al., 2013; 2014) como principal fator gerador de escórias e incrustações durante a combustão. Por isso, a norma ISO 17225 (2014), estabelece valores superiores a 1.100°C como limite mínimo para a qualidade dos *pellets*.

Assim, altas temperaturas de fusão são benéficas para se obter combustíveis sólidos de melhor qualidade. Portanto, os *pellets* de madeira desse estudo, com fusibilidade entre 1.290-1.306°C, têm melhores características na queima do que os *pellets* de bagaço de cana (1.255°C). Dessa forma, a temperatura de fusão das cinzas dos *pellets* de pinus, de madeira nativa e bagaço de cana, apresentados na Tabela 2, estão em conformidade com a norma europeia (Tabela 1), habilitando-os a classificação A1 (para uso residencial), A2 (para uso comercial) e A (para uso industrial), respectivamente.

Conclusões

De acordo com os padrões para os *pellets* estabelecidos na norma ISO 17225, este estudo conclui que:

- Os *pellets* de pinus cumpriram todos os padrões de qualidade exigidos e têm classificação A1 *Premium*, certificados e indicados para uso residencial.
- Os *pellets* de madeira nativa não atendem aos padrões mínimos de qualidade para exportação, podem ser classificados como A2, sobretudo por conterem elevados teores de cinzas;
- Os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, classificados na norma como não-lenhosos, são recomendados para uso industrial e têm classificação A.

Referências

- ADAMS, P. W. R.; LINDEGAARD, K. A critical appraisal of the effectiveness of UK perennial energy crops policy since 1990. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 188-202, 2016.
- BISWAS, A. K.; YANG, W.; BLASIAK, W. Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 9, p. 1711-1717, 2011.
- ACDA, M. N.; DEVERA, E. E. Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 4, p. 589-595, 2014.

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333-1347, 2016.

ALAKANGAS, E. **Properties of wood fuels used in Finland**. Biosouth Project, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes: 2005. 104 p.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

DEMIRBAS, A. Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.72, p.215-219, 2004.

DUCA, D.; RIVA, G.; PEDRETTI, E.F.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, v. 135, p. 9-14, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **EN 15370-1:2006 - Solid biofuels**. Method for the determination of ash melting behaviour. Characteristic temperatures method, Brussels, 2006.

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

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F.H.A. Trends and challenges of origin brazilian agroforestry pellets industry. **Cerne**, v. 22, n. 3, p. 233-240, 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de *pellets* de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, n. 2, p. 14-18, 2013.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. O setor de *pellets* de madeira no Brasil. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 21-28, 2017.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; ÁLVAREZ, A.; LAVÍN, A G.; BUENO, J. L. Study of biomass combustion wastes. **Fuel**, v. 148, p. 152-159, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR

STANDARDIZATION. **ISO 16948: 2015** - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen. Brussels, 2014.

_____. **ISO 16968: 2016** - Solid biofuels - Determination of minor elements. Brussels, 2014.

_____. **ISO 16994: 2016** - Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine. Brussels, 2014.

_____. **ISO 17225-1: 2014** - Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements. Brussels, 2014.

_____. **ISO 17225-2: 2014** - Solid biofuels - Fuels especification and classes - Part 2 - Graded *pellets*. Brussels, 2014.

_____. **ISO 17225-6: 2014** - Solid biofuels - Fuels especification and classes - Part 6 - Graded non-woody *pellets*. Brussels, 2014.

_____. **ISO 17828: 2015** - Solid biofuels - Determination of bulk density. Brussels, 2015.

_____. **ISO 17829: 2015** - Solid biofuels - Determination of length and diameter of *pellets*. Brussels, 2015.

_____. **ISO 17831: 2015** - Solid biofuels - Determination of mechanical durability of *pellets* – part 1. Brussels, 2015.

_____. **ISO 18122: 2015** - Solid biofuels - Determination of ash content. Brussels, 2015.

_____. **ISO 18125: 2015** - Solid biofuels - Determination of calorific value. Brussels, 2015.

_____. **ISO 18134: 2015** - Solid biofuels - Determination of moisture content – part 1. Brussels, 2015.

JAGUSTYN, B.; KMIEC, M.; SMEDOWSKI, L.; SAJDAK, M. The content and emission factors of heavy metals in biomass used for energy purposes in the context of the requirements of international standards. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 1, p. 1-11, 2016.

KIRSTEN, C.; LENZ, V.; SCHRÖDER, H. W.; REPKE, J. U. Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. **Fuel Processing Technology**, v. 148, p. 163-174, 2016.

MIRANDA, M. T.; ARRANZ, J.I.; ROJAS, S.; MONTERO, I.

- Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. **Fuel**, v. 88, n. 11, p. 2106-2112, 2009.
- NADIAH, F.; ABD, B. Production and characterization of bamboo fibre reinforced. **Bioscience Journal**, v. 2012, p. 922-930, 2016.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; VITAL, B.R.; OLIVEIRA, A.C.; CANAL, W.D. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de *pellets* de eucalipto. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 235-242, 2016.
- PINTO, A. A. S.; PEREIRA, B.L.C.; CÂNDIDO, W.L.; OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, C.O.; CARVALHO, A.M.M.L. Caracterização de *pellets* de ponteira de eucalipto. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 232-236, 2015.
- PROTÁSIO, T.P.; BUFALINO, L.; MENDES, R.F.; RIBEIRO, M.X.; TRUGILHO, P.F.; LEITE, E.R. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.
- PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H.F.; MELLO, I.C.N.A.; ANDRA, C.R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. Caracterização energética de *pellets* in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L. GUIMARÃES JUNIOR, M.; TONOLI, G. H.D.; TRUGILHO, P. F. Técnicas multivariadas aplicadas à avaliação de resíduos lignocelulósicos para a produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 771-781, 2013a.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, v. 8, p. 1166-1185, 2013b.
- SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos *pellets* de biomassa florestal produzidos em santa catarina para a geração de energia. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 833-843, 2015.
- TIMUNG, R.; MOHAN, M.; CHILUKOTI, B.; SASMAL, S.; BANERJEE, T.; GOUD, V.V. Optimization of dilute acid and hot water pretreatment of different lignocellulosic biomass: A comparative study. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 9-18, 2015.
- TOSCANO, G.; DUCA, D.; AMATO, A.; PIZZI, A. Emission from realistic utilization of wood pellet stove. **Energy**, v. 68, n.15, p. 644-650, 2014.
- TUMULURU, J. S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v. 119, p. 44-57, 2014.
- VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.
- VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. **Fuel**, v. 105, n. 5, p. 19-39, mar. 2013.
- VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. **Fuel**, v. 117, p. 152-183, 2014.