

Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*

Thiago de Paula Protásio^{1*}, Paulo Fernando Trugilho², Humberto Fauller de Siqueira¹, Isabel Cristina Nogueira Alves de Melo², Carlos Rogério Andrade¹, José Benedito Guimarães Junior¹

¹Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, CP 3, Rodovia BR-364, km 192, CEP 75801615, Jataí, GO, Brasil

²Universidade Federal de Lavras, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil

*Autor correspondente:
depaulaprotasio@gmail.com

Termos para indexação:

Densificação
Tratamento térmico
Biomassa florestal
Energia

Index terms:

Densification
Heat treatment
Forestry biomass
Energy

Histórico do artigo:

Recebido em 19/01/2015
Aprovado em 02/12/2015
Publicado em 31/12/2015

doi: 10.4336/2015.pfb.35.84.843

Resumo - O objetivo deste estudo foi avaliar *pellets* torreficados e *in natura*, produzidos a partir da madeira residual de *Pinus*, destinados ao uso bioenergético. A compactação da madeira residual de *Pinus* sp. oriunda de serraria foi realizada em uma peletizadora com matriz plana de 8 mm. As torrefações foram realizadas em forno elétrico, tipo mufla, estabilizado em temperaturas finais de 220 °C e 250 °C por 30 min. Foram determinadas as seguintes propriedades nos *pellets*: densidades aparente e energética unitárias, densidades a granel e energética do granel, composição química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), poder calorífico superior e umidade. Observou-se aumento do poder calorífico superior e redução do teor de umidade nos *pellets* torreficados, contudo, o ganho em valor calórico foi inferior à perda de massa dos *pellets* após a torrefação, reduzindo assim a densidade energética dos *pellets*. Os *pellets in natura* apresentam potencial de comercialização em países europeus, como Alemanha, Áustria e Suécia. A metodologia utilizada para torrefação não é indicada para o tratamento térmico de *pellets*. Porém, recomendam-se novas pesquisas sobre torrefação de *pellets* em uma faixa mais ampla de temperatura e tempo de residência, visando determinar parâmetros que otimizem as propriedades energéticas.

Energy characterization of fresh and torrefied pellets produced from *Pinus* waste wood

Abstract - The objective of this research was to evaluate torrefied and fresh pellets produced from *Pinus* waste wood, used for direct generation of thermal energy. The compaction of *Pinus* sp. waste wood from lumbermill was performed in a pelletizer with a planar array of 8 mm. Roastings were performed in an electric furnace, type muffle, stabilized at final temperatures of 220 °C and 250 °C for 30 min. The following pellets properties were determined: apparent and unit energy density, bulk density, energy bulk density, immediate chemical composition (volatile materials, ash and fixed carbon), high heating value and moisture. It was observed an increase in high heating value and reduction of moisture content of torrefied pellets. However, the gain in calorific value was less than the mass loss of the pellets after roasting, reducing the energy densities of the pellets. The pellets raw have marketing potential in European countries such as Germany, Austria and Sweden. The methodology used for roasting is not suitable for pellets heat treatment. However, further research on pellet roasting in a wider temperature and residence time range is recommended, in order to define parameters that optimize their energetic properties.

Introdução

A matriz energética mundial ainda se encontra baseada nos combustíveis fósseis, sendo este considerado um dos principais fatores responsáveis pelo aquecimento global, devido a grande quantidade de gases poluentes emitidos após a combustão (Brasil, 2014). Atualmente, a busca por fontes renováveis de energia tem despertado o interesse de vários países e é uma tendência que deve ser fortalecida, principalmente por questões ambientais e econômicas.

No cenário brasileiro, a dependência de fontes não renováveis para geração de energia está mudando. Atualmente há uma participação de 41% de fontes renováveis na oferta interna de energia (Brasil, 2014). Nesse contexto, a biomassa vegetal tem sido considerada energia renovável de grande potencialidade, que pode contribuir consideravelmente para a redução do consumo dos combustíveis não renováveis (Kim et al., 2010; Stelte et al., 2011; Protásio et al., 2013, 2014).

Perante a significativa participação da biomassa florestal para produção bioenergética, destacam-se os mais diversos usos da madeira para este fim, por exemplo, a lenha *in natura*, a transformação em carvão vegetal e o processamento da madeira para produção de cavacos e/ou para produção de briquetes e *pellets*.

Os *pellets* e briquetes são oriundos do processo de densificação da biomassa, ou seja, transformação física do material lignocelulósico particulado em um biocombustível sólido. Ao longo do desenvolvimento da biomassa compactada, os briquetes antecedem aos *pellets*. Estes últimos foram criados em função da demanda por um novo tipo de combustível compactado com alta densidade energética, para o transporte a maiores distâncias, otimização do armazenamento e principalmente para o uso em equipamentos de queima mais modernos.

Além da densificação para melhoria nas propriedades energéticas da biomassa, o processo de torrefação tem o mesmo objetivo. Este tratamento térmico consiste em submeter o material lignocelulósico a baixas temperaturas com ausência de oxigênio, onde o processo termoquímico resulta na degradação de parte das hemiceluloses e permite a concentração do carbono, aumentando, assim, o poder calorífico do combustível.

Portanto, a peletização aliada ao tratamento térmico da biomassa visa aumentar a densidade energética da biocombustível sólido, gerar um combustível mais homogêneo e com menor umidade e melhorar

a eficiência de queima dos *pellets* em equipamentos industriais. Sendo assim, unir os dois processos de transformação de resíduos em energia pode ser uma vantagem para que o biocombustível sólido produzido seja altamente competitivo frente aos combustíveis não renováveis que atualmente têm maior participação no setor industrial.

Dias et al. (2012) e Rousset et al. (2013) concordam que o Brasil é um dos poucos países que apresenta grande potencial de expansão de uso e produção de biomassa para fins bioenergéticos, devido a grande disponibilidade de áreas de cultivo e a intensa geração de resíduos lignocelulósicos. No entanto, ainda são escassos os trabalhos disponíveis na literatura sobre *pellets* de madeira e o potencial brasileiro para produção desses biocombustíveis sólidos para uso interno ou mesmo para exportação de energia renovável e limpa, especialmente para os países membros da comunidade europeia, que são os principais consumidores.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físicas, químicas e energéticas de *pellets in natura* e torreficados, produzidos a partir da madeira residual de *Pinus*, destinados à geração de calor.

Material e métodos

Foi utilizada, como matéria-prima, serragem de madeira de *Pinus*, oriunda do estado de São Paulo. As partículas com dimensões inferiores a 6 mm foram armazenadas em condição ambiente, até atingir a umidade de equilíbrio higroscópico (10 – 12% na base seca).

A compactação das partículas de *Pinus* spp. foi realizada em uma peletizadora da marca Eng-Maq®, modelo 0200v, capacidade de 110 kg h⁻¹ e matriz plana de 8 mm. Após a produção dos *pellets*, realizaram-se as torrefações em um forno elétrico (mufla), sendo utilizado em cada ensaio aproximadamente 500 g de *pellets* acondicionados a um reator com objetivo de impedir a entrada de oxigênio durante o tratamento térmico.

As amostras foram previamente secas em estufa a 103 ± 2 °C. A temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C e as temperaturas finais foram de 220 °C e 250 °C, considerando-se uma taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹ (100 °C h⁻¹). O forno elétrico permaneceu estabilizado nas temperaturas finais por 30 min.

Após as torrefações, determinou-se a perda de massa das partículas, como sendo a quantidade de massa degradada dos *pellets* torreficados dividida pela

massa de *pellets in natura* (Equação 1). Em seguida, os *pellets in natura* e torreficados foram armazenados em câmara climática até estabilização para prosseguir com as análises.

$$\text{Perda de massa} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde: M_i = massa de *pellets in natura* (g); M_f = massa de *pellets* torreficados (g).

A densidade aparente unitária dos *pellets in natura* e torreficados 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 100 *pellets* de cada amostra.

Para a determinação da densidade a granel dos *pellets* tomou-se como base o material acondicionado em condição ambiente de temperatura e umidade relativa. Foram constituídas amostras de 100 cm³ com três repetições de cada tipo de combustível granulado, sendo determinada a massa de cada amostra, por meio de uma balança analítica com precisão de 0,0001 g.

Para determinação do poder calorífico superior e análise química imediata dos *pellets*, as amostras foram transformadas em serragem, utilizando-se um moinho de facas, de acordo com a norma TAPPI 257 cm-85 (Techinal Association of the Pulp and Paper Industry, 1985).

O poder calorífico superior dos *pellets* (PCS) foi obtido em um calorímetro digital IKA C-200® segundo a norma ASTM E711-87 (American Society for Testing Materials, 2004). Dessa forma, foi possível calcular a densidade energética unitária dos *pellets* conforme Equação 2.

$$D E_U = D A_U \times P C S \quad (2)$$

Onde: DE_U = densidade energética unitária (kcal m⁻³); DA_U = densidade aparente unitária (kg m⁻³); PCS = poder calorífico superior (kcal kg⁻¹).

A densidade energética do granel foi determinada conforme Equação 3.

$$D E_G = D G \times P C S \quad (3)$$

Onde: DE_G = densidade energética a granel (kcal m⁻³); DG = densidade a granel (kg m⁻³); PCS = poder calorífico superior (kcal kg⁻¹).

Foi realizada a análise química imediata dos *pellets* produzidos, sendo determinados os teores de umidade em base seca, materiais voláteis, cinzas e, por diferença, de carbono fixo, conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (American Society for Testing Materials, 2007).

Para a análise estatística dos dados foi considerado um delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos e três repetições, utilizando-se o *software* R (R Core Team, 2014). Apenas para as densidades unitárias (aparente e energética) foram considerados os 100 *pellets* amostrados. Para a comparação múltipla das médias utilizou-se o teste Scott-Knott a 5% de significância (Scott & Knott, 1974).

Resultados e discussão

Foi observada perda de 2,4% e 7,8% de massa dos *pellets* torreficados a 220 °C e 250 °C, respectivamente. Peng et al. (2014) encontraram perda de 21,6% de massa para *pellets* de *Pinus* sp. torreficados a 270 °C, ou seja, valor consideravelmente superior ao encontrado neste trabalho.

Vale ressaltar que o tempo de residência dos *pellets* no reator de torrefação influencia a perda de massa do material torreficado. O menor tempo de residência implica em maior rendimento do processo e, conseqüentemente, menor será a perda energética envolvida na obtenção dos *pellets* ou resíduos lignocelulósicos torreficados (Chen et al., 2014).

O tratamento térmico destes combustíveis possivelmente resultou no aumento da concentração de carbono e diminuição da concentração de oxigênio contido na madeira residual de *Pinus*. Dessa forma, observou-se que o poder calorífico superior dos *pellets* torreficados foi maior comparativamente aos *pellets in natura* (Tabela 1).

Tabela 1. Poder calorífico superior e umidade na base seca para os *pellets* avaliados.

Pellets	Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	Umidade na base seca (%)
<i>in natura</i>	4.815 b	8,0 a
220 °C	5.200 a	1,6 b
250 °C	5.234 a	1,1 c
Coefficiente de variação experimental (%)	0,68	1,31

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott – Knott a 5% de significância.

Para os *pellets* torreficados, a diferença de poder calorífico superior encontrada, do ponto de vista prático para geração de energia, pode ser considerada significativa, pois foi maior que 300 kcal kg⁻¹ (Brand, 2010).

Observa-se que os biocombustíveis torreficados apresentaram menor umidade na base seca (Tabela 1), em função da degradação das hemiceluloses e, conseqüentemente, dos sítios de sorção na biomassa vegetal. Sabe-se que as hemiceluloses são instáveis termicamente e são as principais a serem degradadas na torrefação, pois se decompõem em baixas temperaturas (220 – 315 °C) (Prins et al., 2006; Yang et al., 2007). Além disso, essas moléculas são as principais responsáveis pela adsorção de água da biomassa (Prins et al., 2006). Dessa forma, torna-se favorável a aplicação do tratamento térmico às biomassas utilizadas para fins energéticos, uma vez que reduz a quantidade de água presente na biomassa além de elevar o valor calórico de cada material.

Observou-se também que houve redução de aproximadamente 82% de umidade entre os *pellets* tratados termicamente em relação aos *in natura*, sendo que esse resultado pode ser considerado vantajoso. No entanto, torna-se necessário avaliar o comportamento das demais propriedades dos *pellets*, de forma a adequar às normativas internacionais de comercialização de biocombustíveis.

A umidade de todos os *pellets* avaliados atendeu as normas alemã DIN 51731 (Deutsches Institut Für Normung, 1996) e austríaca ÖNORM M 7135 (Österreichisches Normungsinstitut, 2000), que exigem valores máximos de 12%. No entanto, a norma sueca SS 18 71 20 (Swedish Standards Institute, 1999) estabelece valor máximo de 10% de umidade para que os *pellets* possam ser enquadrados na melhor classe (grupo 1).

Quanto à densidade aparente unitária, observa-se que *pellets in natura* apresentaram valor estatisticamente superior aos tratados termicamente. Além disso, pode-se constatar que o aumento da temperatura de torrefação provocou uma redução desta propriedade (Figura 1).

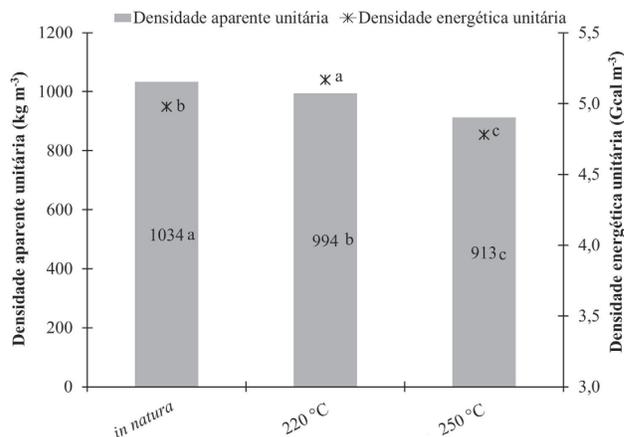


Figura 1 - Densidade aparente unitária e densidade energética unitária dos *pellets*. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott – Knott a 5% de significância. Coeficiente de variação experimental para as densidades aparente e energética: 9,77% e 9,91%, respectivamente.

Este resultado pode ser atribuído à perda de massa durante o processo de torrefação, devido à degradação dos compostos químicos da parede celular, principalmente as hemiceluloses. Observou-se também que os *pellets* torreficados apresentaram a superfície mais áspera. Peng et al. (2014) relataram comportamento semelhante para a torrefação de *pellets* de *Pinus* sp. à temperatura superior a 270 °C.

A densidade energética representa a quantidade de energia que pode ser liberada após a combustão completa de determinado volume de combustível. Dessa forma, observou-se que a densidade energética unitária dos *pellets in natura* foi estatisticamente inferior aos *pellets* torreficados a 220 °C e superior ao encontrado para *pellets* torreficados a 250 °C. Esse resultado demonstra que, possivelmente, a torrefação a 220 °C foi adequada, contribuindo para maximizar a quantidade de energia por unidade de volume de cada *pellet*.

Liu et al. (2013) observaram densidade aparente unitária de 1.250 kg m⁻³ e 1.350 kg m⁻³ para *pellets* produzidos com partículas de bambu e casca de arroz, respectivamente, valores superiores ao encontrado neste estudo. Estas diferenças podem ser atribuídas às distintas

densidades de cada material e, conseqüentemente, pela resistência à compressão durante o processo de peletização.

Dessa forma, a densidade pode ser considerada o principal índice de qualidade para o uso energético dos combustíveis de biomassa, pois influencia diretamente a densidade energética. Ainda nesse aspecto, é desejável obter maiores valores de densidade a granel, pois fatores como os custos com transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica do uso da energia da biomassa, pois permite transportar maior quantidade de energia por unidade de volume (Stelte et al., 2011).

Observa-se que *pellets* torreficados apresentaram menores valores de densidade a granel. Por outro lado, os *pellets in natura* se destacaram com os maiores valores, o que resultou em elevada densidade energética a granel, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume considerado, quando comparado aos *pellets* tratados termicamente. Com o processo de torrefação, ocorre a perda de massa e redução no volume dos *pellets*, contudo, observou-se que a perda de massa foi mais significativa do que a redução de volume dos *pellets* torreficados, acarretando a redução da densidade a granel dos *pellets* torreficados (Figura 2).

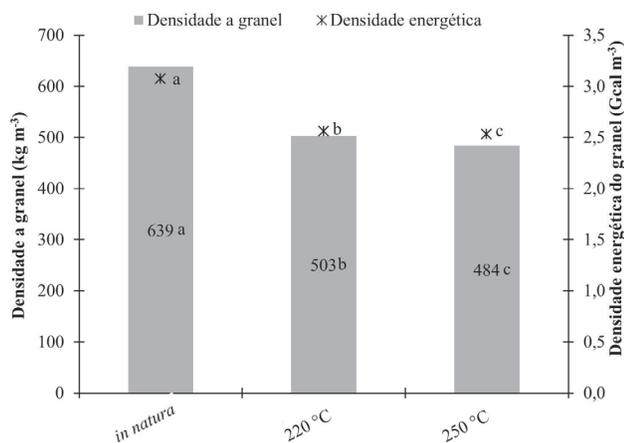


Figura 2 - Densidade a granel e densidade energética do granel dos *pellets*. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott – Knott a 5% de significância. Coeficiente de variação experimental para as densidades a granel e energética: 1,07% e 1,25%, respectivamente.

Dentre os combustíveis granulados, os *pellets in natura* apresentaram maior valor para densidade energética do granel (3,07 Gcal m⁻³), resultado atribuído à sua alta densidade a granel e ao elevado poder calorífico obtido (Tabela 1). Liu et al. (2013), estudando *pellets* com 6 mm de diâmetro de partículas de casca de arroz, encontraram densidade do granel de 640 kg m⁻³, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho para os *pellets in natura*. Os mesmos autores observaram densidade do granel para *pellets* de bambu de 540 kg m⁻³. Isso demonstra a importância da biomassa lignocelulósica e da máquina utilizada no processo de compactação, pois são fatores decisivos na qualidade e desempenho energético dos biocombustíveis produzidos.

Observou-se que com o aumento da temperatura de torrefação houve uma redução da densidade a granel dos *pellets*. Acredita-se que essa redução ocorreu devido à degradação térmica das hemiceluloses, uma vez que estas moléculas são instáveis termicamente e se degradam a temperaturas entre 220-315 °C (Prins et al., 2006; Yang et al., 2007), o que refletiu diretamente na redução da densidade energética do granel. Além disso, o aumento do valor calórico foi inferior ao decréscimo da densidade do granel, o que contribuiu com a redução da densidade energética. Por isso, recomenda-se a redução da temperatura de torrefação, visando melhorar essa propriedade energética, bem como alteração do sistema empregado no tratamento térmico.

Peng et al. (2014) em estudos sobre efeito do tratamento térmico de *pellets* de madeira observaram decréscimo de 40% da densidade a granel após torrefação dos *pellets*, reduzindo de 630 kg m⁻³ para 380 kg m⁻³.

Segundo a norma alemã DIN 51731 (Deutsches Institut Für Normung, 1996) e a norma sueca SS 18 71 20 (Swedish Standards Institute, 1999) os *pellets* devem apresentar densidade a granel superior a 600 kg m⁻³ para que possam ser comercializados nos referidos países, independente da classe para a primeira normativa e como classe 1 para a segunda. Logo, apenas os *pellets in natura* atenderam essa exigência internacional e poderiam ser exportados para a Alemanha e Suécia.

Devido à ausência de normativas de comercialização de *pellets* no Brasil, torna-se necessário a adequação dos combustíveis sólidos produzidos, conforme exigências

dos países consumidores. Cabe ressaltar que os países europeus são os maiores produtores e consumidores mundiais desses combustíveis sólidos granulados e que as demais propriedades dos *pellets* também devem ser levadas em consideração, como o poder calorífico, umidade e cinzas.

Considerando que um caminhão bitrem basculante, usualmente empregado no transporte de combustíveis de

materiais lignocelulósicos, com capacidade para 40 m³ (Garcia et al., 2011) e a quantidade de energia possível de ser liberada após a combustão completa de cada tipo de biomassa, pode-se calcular a quantidade de energia transportada e o número de viagens a serem realizadas para transportar a mesma quantidade de energia quando comparamos diferentes tipos de biomassa com os *pellets in natura* deste estudo (Tabela 2).

Tabela 2. Análise comparativa da densidade energética dos *pellets* de *Pinus* e outros biocombustíveis.

Biomassa	Densidade a granel (kg m ⁻³)	Massa transportada em 40 m ³ (kg)	PCI (kcal kg ⁻¹)***	Energia transportada (Gcal)	Quantidade de viagens em relação aos pellets
<i>Pellets</i> de <i>Pinus in natura</i> (8 mm)	639	25.560	4.491	114,79	1,0
Serragem de <i>Pinus</i> sp.*	230	9.200	4.121	37,91	3,0
Serragem de eucalipto**	224	8.960	4.088	36,63	3,1
Cavaco de <i>Pinus</i> **	211	8.440	3.882	32,76	3,5
Resíduos de milho*	83	3.320	4.191	13,91	8,3

*Peng et al. (2013); **Garcia et al. (2011); ***PCI = PCS – 324 (Brand, 2010).

Pode-se observar que, quanto menor a densidade a granel da biomassa, maior será a quantidade de viagens a serem realizadas para que corresponda à mesma energia transportada em um percurso do caminhão bitrem carregado com os *pellets*, sendo necessário realizar até 3,0 vezes mais viagens quando se considera o transporte de serragem de *Pinus* sp., por exemplo.

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

O resultado obtido para análise química imediata evidencia que os *pellets in natura* e torreficados a 220 °C apresentaram, estatisticamente, o mesmo valor para teor de cinzas e inferior aos *pellets* torreficados a 250 °C (Tabela 3). Esse parâmetro pode ser decisivo e limitante para a comercialização desses biocombustíveis sólidos, pois os óxidos minerais diminuem o valor calórico e aumenta a corrosão dos equipamentos destinados à conversão energética (Tan & Lagerkvist, 2011; Bustamante-García et al., 2013).

Tabela 3. Composição química imediata dos *pellets* avaliados.

<i>Pellet</i>	Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
<i>in natura</i>	84,5 a	0,3 b	15,2 c
220 °C	83,1 b	0,3 b	16,6 b
250 °C	79,5 c	0,4 a	20,1 a
Coefficiente de variação experimental (%)	0,64	3,74	2,99

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott – Knott a 5% de significância.

Segundo a norma alemã DIN 51731 (Deutsches Institut Für Normung, 1996), independente da classe, os pellets devem apresentar no máximo 1,5% de cinzas na sua constituição química. A norma austríaca ÖNORM M 7135 (Österreichisches Normungsinstitut, 2000) também é rigorosa quanto ao teor de cinzas dos pellets produzidos com madeira, e estabelece o valor máximo de 0,5%, e a norma sueca SS 18 71 20 (Swedish Standards Institute, 1999) define, para os *pellets* do grupo 1, o valor máximo de 0,7% de cinzas. Dessa forma, todos os combustíveis compactados atenderam a essas normativas internacionais quanto a esse requisito.

O valor médio de cinzas, na base seca, relatado por Protásio et al. (2013) para a madeira residual de *Pinus*

foi de apenas 0,4%, ou seja, semelhante ao encontrado para os *pellets in natura* e torreficados.

Pode-se afirmar que os *pellets in natura* apresentam menor temperatura de ignição, pois a maior quantidade e a emissão rápida de materiais voláteis são fatores que contribuem decisivamente para acelerar a ignição do combustível a uma temperatura inferior (Moon et al., 2013). Enquanto, os combustíveis com maiores teores de carbono fixo tendem a queimar mais lentamente, apresentam maior estabilidade térmica e temperatura de ignição superior.

Observa-se, ainda, uma tendência de diminuição do teor de materiais voláteis e aumento do teor de carbono fixo com o acréscimo da temperatura de torrefação, corroborando com o trabalho de Protásio et al. (2012) para briquetes de casca de café.

Conclusões

Os *pellets in natura* analisados adequam-se às normativas europeias de comercialização, apresentando potencial para exportação aos principais consumidores de *pellets*, por exemplo, Alemanha, Áustria e Suécia.

A torrefação a 220 °C e 250 °C, em um forno mufla, favoreceu o aumento do poder calorífico superior e redução da umidade dos *pellets*. Porém, a metodologia adotada não é indicada para o tratamento térmico de *pellets*, devido à redução da densidade energética deste biocombustível sólido granulado.

Recomendam-se novas pesquisas sobre torrefação de *pellets* com *Pinus* sp. e demais biomassas lignocelulósicas em faixas mais amplas de temperatura e tempo de residência, visando determinar parâmetros que otimizem a densidade energética dos biocombustíveis sólidos granulados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da CAPES, do CNPq, da FAPEMIG e da empresa Eng-Maq por concederem recursos financeiros para aquisição de suplementos fundamentais para a realização desse trabalho.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E711-87**: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia, 2004. 8 p.

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

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014. 288 p.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, Washington, US, v. 42, p. 169–174, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.04.034.

CHEN, D.; ZHOU, J.; ZHANG, Q.; ZHU, X.; LU, Q. Upgrading of rice husk by torrefaction and its influence on the fuel properties. **BioResources**, Railegh, v. 9, n. 4, p. 5893-5905, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51731**: testing of solid fuels: compressed untreated wood, requirements and testing. Berlin, 1996. 4 p.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYOMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de *pellets* de madeira. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA E BIOTECH FAIR, 7., 2011, Curitiba. **Anais...**Curitiba: SESI/FIEP, 2011.

KIM, U.-J.; EOM, S. H.; WADA, M. Thermal decomposition of native cellulose: influence on crystallite size. **Polymer Degradation and Stability**, Essex, v. 95, n. 5, p. 778–781, 2010. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2010.02.009.

LIU, Z.; LIU, X.; FEI, B.; JIANG, Z.; CAI, Z.; YU, Y. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, Oxford, v. 55, p. 1-5, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.12.014.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Amsterdam, v. 47, p. 232–240, 2013. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019

ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT. **ÖNORM M 7135**: compressed wood or compressed bark in natural state: pellets and briquettes: requirements and test specifications. Wien, 2000. 10 p.

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, London, v. 111, p. 411-421, 2013. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.04.048.

PENG, J.; WANG, J.; BI, T. X.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S.; PENG, H.; JIA, D. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 168-173, 2014. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.09.010.

- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: part 2. analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, London, v. 77, p. 35-40, 2006. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.01.001.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001100015>.
- 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**, Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CÉSAR, A. A. S.; NAPOLI, A.; MELO, I. C. N. A.; SILVA, M. G. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **SpringerPlus**, Heidelberg, v. 3, n. 124, p. 1-14, 2014.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 nov. 2014.
- ROUSSET, P.; FERNANDES, K.; VALE, A.; MACEDO, L.; BENOIST, A. Change in particle size distribution of Torrefied biomass during cold fluidization. **Energy**, Oxford, v. 51, p. 71-77, 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2013.01.030.
- SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, US, v. 30, n. 2, p. 507-512, 1974. DOI: 10.2307/2529204.
- STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. **Fuel**, London, v. 90, n. 11, p. 3285-3290, 2011. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.05.011.
- SWEDISH STANDARDS INSTITUTE. **SS 187180**: biofuels and peat: determination of mechanical durability of pellets and briquettes, pellets. Stockholm, 1999.
- TAN, Z.; LAGERKVIST, A. Phosphorous recovery from the biomass ash: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 3588-3602, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.05.016
- TECHINICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 257 cm-85**: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta, 1985.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.