

Recebido: 06-05-2015 Aceito: 07-07-2015

Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor

Karine Andressa Pelanda^{1*}, Daniele Cristina Potulski¹, Dimas Agostinho da Silva¹, Fernando Augusto Ferraz²

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil.

RESUMO Este trabalho teve por objetivo avaliar as possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor, considerando as propriedades energéticas e a composição química das cinzas. Foram utilizadas nove amostras (briquete de madeira tropical, briquete de Pinus, carvão vegetal, aparas de MDF, aparas de aglomerado, serragem de Pinus, serragem de Eucalipto, casca de Eucalipto e resíduo florestal *mix*) que foram submetidas à análise química imediata para determinação dos materiais voláteis, carbono fixo, teor de cinza e poder calorífico superior. A composição química das cinzas das amostras foi determinada pelo método de fluorescência de Raio-X. Foram utilizados índices empíricos para avaliar o comportamento das cinzas e sua tendência em criar depósitos e incrustações em geradores de vapor durante o processo de combustão. Um diagrama ternário foi desenvolvido para classificar as cinzas em relação ao nível de acidez dos óxidos. O carvão vegetal apresentou o maior poder calorífico superior, seguido do briquete de Pinus e de madeira tropical. A casca de Eucalipto e os resíduos florestais *mix* apresentaram os menores valores de poder calorífico superior. As cinzas de aparas de MDF e aglomerado, serragem de Eucalipto e o carvão vegetal tem alta tendência à formação de escórias e incrustações na caldeira. As cinzas do briquete de madeira tropical é a que apresenta a menor possibilidade de formação de escórias e incrustações. **Palavras-chave:** resíduos de madeira, composição química das cinzas, caldeira, escórias, incrustações.

The influence of different forest biomass as biofuel in boilers

ABSTRACT The aim of this study was to evaluate the possible implications of different forest biomass as biofuel in boilers, regarding the energetic properties and the chemical composition of ashes. Nine samples (briquette from tropical wood, briquette from pine, charcoal, MDF shavings, particleboard shavings, pine sawdust, *Eucalyptus* sawdust, *Eucalyptus* bark and forest waste *mix*) were used. Volatile matter, fixed carbon and ash content by proximate analysis and higher heating value (HHV) were determined. Chemical composition of ashes was determined by fluorescence X-ray. Empirical ratings were used to evaluate the behavior of ashes and its tendency to create slagging and fouling into the boilers during the combustion process. A ternary diagram was used to classify the ashes content as a function of the acidity of the oxides. The charcoal presented the highest HHV, followed by the briquette from pine and the briquette from tropical wood. The bark of *Eucalyptus* and the forest waste *mix* showed the lowest HHV. The ashes of MDF and particleboard shavings, *Eucalyptus* sawdust and charcoal had a high tendency to form slagging and fouling into the boiler. The ashes from briquette of tropical wood had the lowest tendency in create slagging and fouling.

Keywords: wood wastes, ash chemical composition, boilers, slagging, fouling.

Introdução

A busca por fontes alternativas de menor impacto ambiental para a produção de energia, fez com que a biomassa passasse a ocupar uma posição importante em

relação às demais. Segundo dados apresentados pela *International Energy Agency* – IEA (2013), a biomassa de madeira responde por 10% da matriz energética mundial e o Ministério de Minas e Energia – MME (2013) revela que na

matriz energética brasileira a biomassa florestal representa 8,3% do total.

A biomassa florestal tem grande importância para energia, tanto a que é proveniente da floresta quanto a que é de resíduos florestais oriundos da colheita e industrialização da madeira. No Brasil, a estimativa de geração de resíduos florestais é muito variável: 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2009) e 87,8 milhões em 2020 (BORTOLIN et al., 2012). Para a STCP (2011) são geradas entre 75 e 90% de resíduos em todo o processo produtivo florestal e madeireiro, considerando deste a retirada da árvore da floresta até o produto final.

Esses resíduos são utilizados como biocombustíveis para geração de energia por meio do processo de conversão termoquímica de combustão. Nesse processo os elementos orgânicos presentes no combustível sofrem a oxidação total ou parcial, realizando a conversão da energia química em calor.

Os sistemas de combustão possuem aspectos ambientais importantes a serem considerados, dentre eles a produção de cinzas, que são resíduos do processo e não participam das reações. Brand (2010) relata que na biomassa florestal, o teor de cinzas representa a porcentagem de componentes minerais contidos no material. Este teor sofre influência de alguns fatores como: condições ambientais de crescimento, espécie, posição da biomassa no vegetal (casca, folhas, tronco) e idade (SJÖSTRÖM, 1993; ELOY et al., 2015).

Os principais elementos químicos presentes nas cinzas de biomassa são K, Ca, P, Si, Al, Fe e Mg (JENKINS et al., 1998). Esses elementos podem formar nas superfícies de troca térmica dos geradores de vapor severas deposições gerando escórias que podem levar ao mau funcionamento e reduzir a eficiência da transferência de calor (VAMVUKA et al., 2014). Além disso, as deposições podem gerar incrustações e

corrosões que aceleram o desgaste das superfícies de troca térmica (DAYTON et al., 1999).

O potencial de formação de escórias depende da capacidade de fusão dos elementos químicos presentes nas cinzas. Já a formação de incrustação é iniciada com um processo de sinterização, resultando em depósitos muito duros e de difícil remoção com o tempo (PRONOBIS, 2005).

Do ponto de vista energético, a escolha de uma biomassa florestal para geração de energia é feita, quase sempre, considerando apenas o aspecto da capacidade energética do material. Por outro lado, o efeito das cinzas de biomassa florestal no decorrer do processo de combustão nos geradores de vapor ainda é pouco estudado e a probabilidade de geração de escórias e incrustações pode inviabilizar a sua aplicação, principalmente devido ao aumento significativo dos custos com manutenção nos equipamentos. Por isso uma análise deve ser realizada a fim de definir até que ponto um material de alto potencial energético pode ser utilizado como combustível, mas também considerando o fator cinzas.

Neste sentido, esse trabalho teve por objetivo avaliar as possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais, como biocombustível em geradores de vapor, considerando as suas propriedades energéticas e a composição química das cinzas.

Material e Métodos

Matéria-prima

Neste estudo foram analisadas nove diferentes amostras de biomassa florestal utilizadas como biocombustíveis, conforme a relação apresentada na Tabela 1. A amostragem e preparo do material seguiram os procedimentos da norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 14660 (ABNT, 2004).

Tabela 1. Relação das amostras de biomassa florestais.
Table 1. List of the wood waste and forest biomass samples.

AMOSTRA DE CINZAS	ID.*
Briquete de madeira tropical	BRIt
Briquete de madeira de Pinus	BRIp
Carvão vegetal	CV
Aparas de <i>Medium Density Fiber</i>	A-MDF
Aparas de aglomerado	A-AGL
Serragem de Pinus	SP
Serragem de Eucalipto.	SE
Casca de <i>Eucalipto</i> .	CE
Resíduo florestal <i>mix</i>	Rmix*

*NOTA: ID.= Identificação; Rmix= Mistura de galhos, folhas e casca provenientes da colheita florestal.

Caracterização energética da biomassa

A realização da análise química imediata, para determinação dos teores de materiais voláteis, de carbono fixo e cinzas, foi realizada conforme a norma NBR 8112/83 (ABNT, 1983), com três repetições. O poder calorífico superior foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica IKA WERKE C5000, seguindo os procedimentos da norma NBR 8633 (ABNT, 1984), com três repetições.

Composição química das cinzas

As amostras das cinzas de cada material foram homogeneizadas e secas a 100°C. A varredura química foi executada a partir de pastilha prensada e analisada por meio do método de espectroscopia de fluorescência de Raios-X, utilizando equipamento Philips, Modelo PW2400. O método constituiu pela análise semiquantitativa por meio do software Semi-Q Philips. Todos os resultados foram normalizados para 100%.

Índices de escoriação e incrustação de cinzas em geradores de vapor

Foram utilizados índices empíricos para avaliar o comportamento das cinzas e sua tendência em criar depósitos e incrustações na caldeira durante o processo de combustão.

Estes índices foram originalmente criados para combustíveis fósseis, mas têm sido utilizados para análise de biomassa como combustível em geradores de vapor (JENKINS, 1998; PRONOBIS, 2005; VAMVUKA et al, 2014).

Os índices estimados estão descritos nas equações abaixo:

Índice de escoriação (B/A) – *Slagging Index*: é a relação base-ácido que tem sido usada para medir a tendência de incrustações causadas pelas cinzas do combustível, e está descrita na Equação 1:

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \right) \quad \text{Equação 1}$$

A Equação 1 foi calculada para combustíveis fósseis, *a priori*, com baixo teor de fósforo (P). Seguindo a metodologia proposta por Pronobis (2005), este teor foi considerado na relação apresentada na Equação 2:

$$\frac{B}{A} + P = \left(\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Em que: B/A < 0,5 - baixa propensão à escoriação
 0,5 < B/A < 1,0 - média propensão à escoriação
 B/A = 1,0 - alta propensão à escoriação
 B/A ≥ 1,75 - severa propensão à escoriação

Índices de incrustação (FI) – *Fouling Index*: Representa a propensão à formação de incrustação em geradores de vapor, e está apresentada na Equação 3:

$$\text{FI} = \left(\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \right) * (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad \text{Equação 3}$$

Em que: FI ≤ 0,6 - baixa propensão à incrustação

FI = 0,6 a 40 - alta propensão à incrustação

FI ≥ 40 - extremamente alta propensão à incrustação.

Índice de álcalis (IA) (kg/GJ) – *Alkali Index*: expressa a quantidade de óxidos alcalinos no combustível por unidade de energia (MILES et al., 1996; JENKINS et al., 1998), e está representada na Equação 4:

$$IA = \frac{1 \times 10^6 * \text{Cinza \%} * (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \%}{\text{PCS (kJ/kg)}} \quad \text{Equação 4}$$

Em que: $0,17 < IA < 0,34$ - propensão à incrustação e escoriação

$IA > 0,34$ - virtualmente é certa a ocorrência de incrustação e escoriação

Um diagrama ternário foi realizado conforme modelo proposto por Vassilev et al. (2010), para visualizar os possíveis agrupamentos químicos da composição química das cinzas.

Resultados e Discussão

Caracterização energética da biomassa

Observa-se na Tabela 2, que o teor de materiais voláteis variou entre 24,52 e 79,70%, mas a maioria das amostras apresentou valores médios acima de 70%, o que é o esperado para biomassa e desejável no processo de combustão (BOSTRÖM, 2012).

A serragem de Eucalipto apresentou o maior valor médio (79,7%), mas muito próximo para serragem e briquete de Pinus, enquanto que para o carvão vegetal o teor de voláteis foi de apenas 24,52%, sendo este o menor valor encontrado entre as amostras. O resultado para o carvão vegetal é semelhante ao encontrado anteriormente por Protásio et al. (2013) e Protásio et al. (2014) em carvão vegetal proveniente de eucalipto. O menor valor em materiais voláteis no carvão vegetal se deve ao fato de ser uma fonte secundária de energia, enquanto a madeira é a fonte primária, e também devido à degradação térmica ocorrida no processo de carbonização, que gera a eliminação de parte dos materiais voláteis.

Já o teor médio de materiais voláteis encontrado para a casca de Eucalipto ficou abaixo do teor médio das demais fontes primárias analisadas, devido ao elevado teor de cinzas. Segundo Brito e Barrichello (1978) a casca de Eucalipto tende a apresentar o teor de materiais voláteis menor e o teor de carbono fixo maior do que o da madeira da mesma espécie. A mesma tendência foi observada para a amostra de resíduos florestais *mix*, o que pode ser explicado pelo fato do “*mix*” ser uma mistura de galhos, folhas e cascas provenientes da colheita florestal.

Para o carbono fixo, os teores variaram de 16,14 a 74,27% (Tabela 2). O carvão vegetal apresentou o maior valor médio

Tabela 2. Resultados médios da análise química imediata e do poder calorífico superior da biomassa.

Table 2. Means values of proximate analysis and higher heating value for biomass.

Amostra	BRIt	BRIp	CV	A-MDF	A-AGL	SP	SE	CE	Rmix
MV	76,16	79,48	24,52	76,84	78,84	79,45	79,70	61,94	58,28
CF	20,98	18,94	74,27	22,30	20,02	17,85	19,00	16,14	23,47
CZ	2,42	1,58	1,21	0,86	1,53	2,44	1,30	21,91	17,35
PCS	4664	4889	7609	4633	4602	4821	4536	3072	3988

Em que: MV= Materiais voláteis em %; CF= Carbono fixo em %; CZ= Cinzas em %; PCS= Poder calorífico superior em (kcal.kg⁻¹)

para o teor de carbono fixo (74,27%), valor muito superior ao encontrado nas amostras de biomassa in natura, ou seja, fonte

primária de energia. Isto porque o objetivo da carbonização é aumentar o teor de carbono fixo e reduzir o teor de materiais

voláteis e, com isto, melhorar as propriedades energéticas, como por exemplo, aumentar o poder calorífico.

Quanto ao teor de cinzas, os valores médios variaram de 0,86 a 21,91% (Tabela 2), sendo que os maiores valores encontrados foram para a amostra de resíduo florestal *mix* e para a amostra de casca de Eucalipto, 17,35% e 21,91%, respectivamente. A casca tende a apresentar teores mais elevados de cinzas em relação à madeira, como observado por outros autores em estudos anteriores (Mingle e Boubel 1968; Brito e Barrichello, 1978; Eloy et al., 2015), por acumular altos teores de nutrientes. O mesmo comportamento foi observado no resíduo florestal *mix*, provavelmente pelo fato de conter casca na mistura.

O menor valor para o teor de cinzas foi observado para as aparas de MDF (0,86%); vale salientar que Tillman e Harding (2004) encontraram teor de cinzas ainda menor para painéis de partículas (0,41%). O briquete de madeira tropical possui teor de cinzas (2,42%) mais elevado do que o de *Pinus* (1,58%), devido às características da própria madeira. Netto et al. (2006) encontraram valores médios semelhantes de cinzas para biomassas amazônicas (2,17%). A variação do teor de cinzas, quase sempre, é maior em madeiras tropicais em relação a espécies de rápido crescimento como do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. Isto se deve a questões relacionadas ao crescimento, idade e condições geoclimáticas que proporcionam a variação na quantidade de cinzas.

O PCS variou de 3072 a 7609 kcal.kg⁻¹, conforme observado na Tabela 2. O menor valor médio obtido foi para a amostra de casca de Eucalipto (3072 kcal.kg⁻¹) e o maior valor observado foi para o carvão vegetal (7609 kcal.kg⁻¹), estando de acordo com os valores apresentados por Protásio et al. (2011) e Gomes et al. (2014). O teor de carbono fixo tem relação direta com o PCS, o que explica o elevado resultado apresentado pelo carvão vegetal, já o teor de cinzas, quando

presente em alta concentração, pode diminuir o PCS, conforme foi verificado para as cascas de Eucalipto. O poder calorífico superior da maioria dos resíduos de biomassa florestal amostrados está de acordo com o encontrado por Quirino et al. (2005) e Silva et al. (2014) anteriormente, cujos valores variaram entre 3888 e 5263 kcal.kg⁻¹ para diversas espécies florestais.

Composição química das cinzas

A composição química das cinzas das amostras estudadas é caracterizada por uma variação nas composições dos materiais inorgânicos, que são apresentados na forma de óxidos minerais (Tabela 3).

Com exceção das aparas de MDF e de aglomerado e do carvão vegetal, mais de 70% da composição química das demais cinzas de biomassas analisadas foi formada pelos elementos SiO₂, Al₂O₃ e CaO, além de quantidades representativas de Fe₂O₃, K₂O e MgO. Segundo Steenari e Lindqvist (1997), as cinzas provenientes de diversos tipos de biomassa costumam apresentar elevados níveis de cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg), por serem nutrientes dos vegetais e usados na adubação do solo. Vamvuka et al. (2014) sugerem que a matéria-prima das biomassas estudadas podem originalmente ter sido impregnada por materiais acidentais como areia, argila e solo, por apresentarem altos teores de silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe).

As aparas de MDF e de aglomerado apresentaram diferentes teores de óxidos na composição química, pois os elementos SiO₂, Al₂O₃ e CaO representaram menos de 50% da composição química total neste caso. Quantidades significativas de P₂O₅, SO₃ e Na₂O foram identificadas nas amostras, revelando que o uso deste tipo de resíduo como combustível pode levar a um alto grau de deposição nas superfícies de troca térmica dos geradores de vapor, uma vez que elementos como

silício (Si), fósforo (P) e sódio (Na) tendem a diminuir a temperatura de fusão da cinza. Além disso, a presença de altos teores de potássio (K) na cinza pode contribuir para a formação do composto eutético, denominado silicato de potássio (VAMVUKA et al., 2014), fazendo com que resíduos como as aparas de MDF e de aglomerado sejam desaconselháveis para a combustão.

Tendência de escoriação e incrustação de cinzas em geradores de vapor

É possível verificar que não houve diferença quanto à tendência de ocorrência de escoriações em gerador de vapor quando comparados os índices com e sem óxido de fósforo (Tabela 4).

Quando comparados os índices de escoriação, incrustação e álcalis, os resultados foram contrastantes em alguns casos, conforme também foi verificado por Munir et al. (2010) em estudo sobre o uso de biomassa misturada a combustível fóssil. De maneira geral, a probabilidade de ocorrência de escoriações foi menor do que a probabilidade de ocorrência de incrustações no interior de geradores de vapor. Já o índice de álcali demonstrou uma grande tendência na geração de escórias e incrustações, relacionado ao uso das aparas de aglomerado e resíduos florestais *mix*. Já a ocorrência destes depósitos é teoricamente certa no caso das cascas de Eucalipto.

É possível estabelecer um paralelo entre a posição de cada amostra de cinzas, conforme apresentado na Figura 1 e os índices de depósitos apresentados na Tabela 4.

Tabela 3. Composição química das cinzas na forma de óxidos.

Table 3. Chemical composition of oxides from ashes

Composto (%)	BRIt	BRIp	CV	A-MDF	A-AGL	SP	SE	CE	Rmix
SiO ₂	73,7	62,1	15,6	21,9	10,8	63,9	35,1	44,7	50,7
Al ₂ O ₃	7,1	9,1	4,0	12,5	2,5	9,7	6,3	16,1	18,4
CaO	8,8	2,2	48,8	14,7	32,0	11,9	44,0	16,0	11,8
P ₂ O ₅	0,3	1,3	0,8	3,5	3,1	0,4	1,8	0,9	0,8
Fe ₂ O ₃	3,9	14,2	2,4	6,8	2,6	5,3	2,4	13,4	11,5
K ₂ O	2,2	4,2	4,4	10,4	12,1	3,0	4,9	3,1	2,1
MgO	2,4	1,3	17,6	6,7	6,3	3,3	2,3	2,0	1,4
TiO ₂	0,4	4,2	0,5	1,2	0,3	1,0	0,5	2,3	1,9
SO ₃	0,7	0,8	3,8	11,0	16,3	1,0	0,6	0,3	0,5
Na ₂ O	0,1	0,1	1,5	9,2	11,8	0,1	1,8	0,2	0,3
MnO	0,3	0,4	0,4	2,0	1,7	0,4	0,1	0,7	0,5
Cl (Cloreto)	0,0	0,0	0,3	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,1
SOMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 4. Análises quantitativa e qualitativa dos índices de deposição de cinzas de diferentes biomassas florestais em geradores de vapor.**Table 4.** Quantitative and qualitative analyzes of ashes deposition from different biomass into the boilers.

	BRI _t	BRI _p	CV	A-MDF	A-AGL	SP	SE	CE	R _{mix}
ANÁLISE QUANTITATIVA									
Escorificação	0,21	0,29	3,71	1,34	4,73	0,32	1,32	0,55	0,38
Escorificação + P	0,22	0,31	3,75	1,44	4,95	0,32	1,37	0,56	0,39
Incrustação	0,47	1,23	17,45	25,60	98,75	0,70	7,42	1,71	0,88
Álcalis	0,03	0,03	0,02	0,08	0,17	0,03	0,04	0,37	0,30
ANÁLISE QUALITATIVA									
Escorificação	Baixa	Baixa	Severa	Alta	Severa	Baixa	Alta	Média	Baixa
Escorificação + P	Baixa	Baixa	Severa	Alta	Severa	Baixa	Alta	Média	Baixa
Incrustação	Baixa	Alta	Alta	Alta	Muito alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Álcalis	NP	NP	NP	NP	P	NP	NP	MP	P

Em que: NP) Não provável P) provável; MP) muito provável.

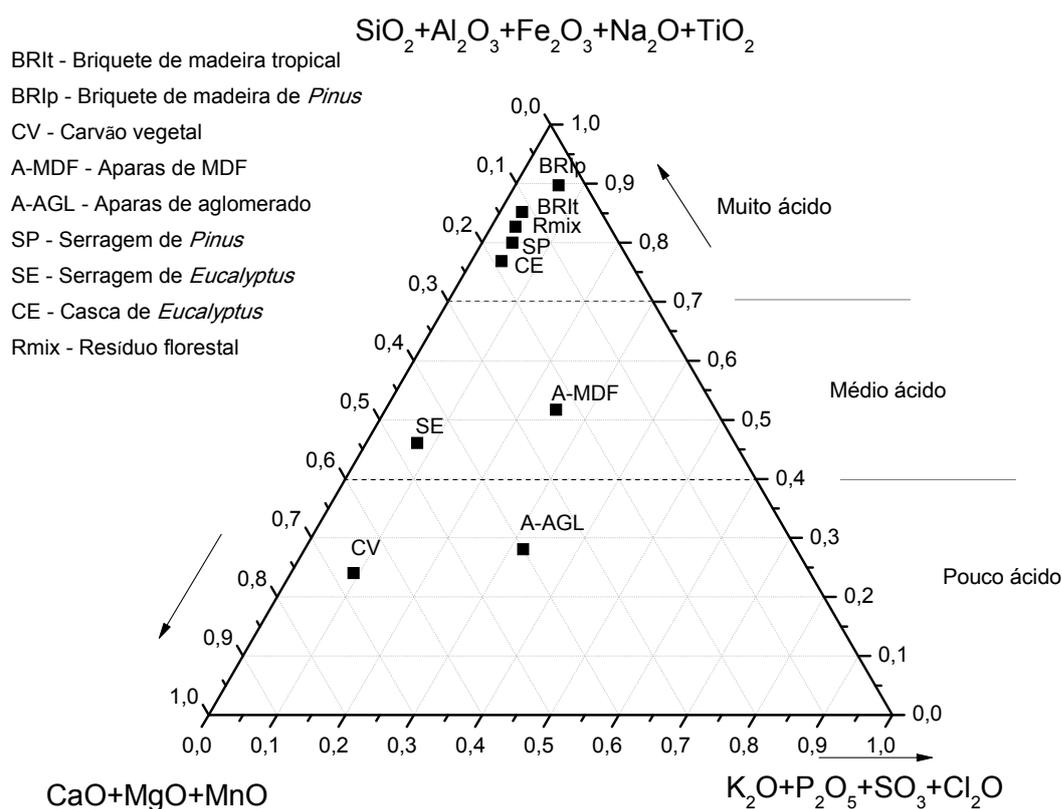
**Figura 1.** Diagrama ternário contendo a posição das cinzas de cada biomassa de acordo com a classificação da composição química da matéria inorgânica, em altas temperaturas, baseado em Vassilev et al. (2010).

Figure 1. Ternary diagram position of biomass' ashes according to the classification of inorganic chemical composition at high temperatures, based on Vassilev et al. (2010).

Observa-se que o carvão vegetal e as aparas de aglomerado encontram-se no mesmo grupo, considerado pouco ácido, e de acordo com os índices estimados, são os que possuem maior tendência de apresentar problemas relacionados à combustão, por causa das suas cinzas. Essas podem causar escoriações e incrustações, devido à alta porcentagem de óxidos (K_2O , CaO , Fe_2O_3) responsáveis por baixar a temperatura de fusão das mesmas. As cinzas das aparas demonstraram serem as mais prejudiciais, pois apresentaram altos teores de álcalis, conhecidos por produzirem misturas de sais fundidos nas superfícies acessíveis dos geradores de vapor via vaporização, condensação ou reações secundárias de transformação das cinzas (VAMVUKA; KAKARAS, 2011).

As cinzas da serragem de Eucalipto e das aparas de MDF também apresentaram uma alta tendência, tanto para formação de escórias, como de incrustação, porque a concentração de óxidos básicos é maior do que a concentração de óxidos ácidos, como pode ser observada na relação base-ácido que foi estimada no índice de escoriação (Tabela 4 e Figura 1).

As cinzas das demais amostras (BRIt, BRIp, SP, CE e Rmix) apesar de se posicionarem de maneira semelhante no diagrama ternário, apresentaram comportamento distinto quanto aos índices estimados, pois elementos interagem entre si e os demais óxidos influenciam no comportamento das cinzas em altas temperaturas. Tendo isto em vista, as amostras com relação base-ácido mais baixas, como os briquetes, a serragem de Pinus e o resíduo florestal *mix*, apresentaram baixa tendência de formação de escórias, mas não necessariamente baixa tendência na formação de incrustações. As cinzas da casca de Eucalipto revelaram uma forte tendência em formar depósitos, tanto na forma de escórias como incrustações, uma vez que apesar do alto teor de SiO_2 , ela apresentou teores elevados de óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O), visualizados por meio do índice de álcalis (Tabela 4).

O comportamento acima apresentado é explicado com base no ponto de fusão das cinzas, que varia de acordo com a relação entre os componentes ácidos e básicos, conforme já foi citado. Sabe-se que quanto maior é a concentração de SiO_2 , mais elevado é o ponto de fusão, mas neste caso o ponto de fusão é reduzido pela presença de outros óxidos como o MgO e CaO . O ponto de fusão da alumina e da sílica está em torno de 1600-1700°C. Porém outros componentes, tais como Fe_2O_3 , CaO , MgO e álcalis, tendem a agir como fundentes quando em contato o SiO_2 , e o com Al_2O_3 também em excesso, reduzindo o ponto de fusão das cinzas (CARPENTER, 2006), para 1200-1400 °C.

Conclusões

Do ponto de vista do poder calorífico superior todas as biomassas estudadas têm potencial energético, destacando-se o carvão vegetal.

Com relação ao teor de cinzas deve-se ressaltar as biomassas de casca de Eucalipto e o Resíduo florestal *mix* que apresentaram os teores mais elevados, e também os maiores índices de álcalis, que relacionam a formação de depósitos com a produção de cinzas.

Não se recomenda a utilização das aparas de MDF e de aglomerado, pois além da alta tendência a formação de depósitos nas superfícies dos geradores de vapor, precisa-se levar em consideração os aspectos ambientais e de toxicidade, relacionados à combustão.

Deve ressaltar que apesar do carvão vegetal apresentar alto poder calorífico e baixo teor de cinzas, tem alta tendência à formação de escórias e incrustações. Considerando o baixo índice de álcalis, que relaciona a produção de cinzas com a formação de depósitos, o carvão vegetal torna-se um biocombustível com bom potencial dentre as biomassas analisadas.

De maneira geral, os briquetes e as serragens de madeira também apresentam boas propriedades energéticas e baixa tendência à formação de depósitos.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14660**: Madeira – Amostragem e preparação para análise. São Paulo, 2004. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- BORTOLIN, T.A.; TRENTIN, A.C.; PERESIN, D.; SCHNEIDER, V.E. Estimativa da geração de resíduos florestais no Brasil. **3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**. Bento Gonçalves. 2012.
- BOSTRÖM, D.; GRIMM, A.; SKOGLUND, N.; BOMAN, C.; ÖHMAN, M.; BROSTRÖM, M.; BACKMAN, R. Ash transformation chemistry during combustion of biomass. **Energy & Fuels**, v. 26, n.1, p. 85-93. 2012.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2010, 114p.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, v. 16, p. 63-70. 1978.
- CARPENTER, A.M. Use of PCI furnace in blast furnaces. **IEA Clean Coal Centre**. 2006.
- DAYTON D. C.; JENKINS B. M.; TURN S. Q.; BAKKER R. R.; WILLIAMS R.B.; BELLEOUDRY D.; HILL L. M. Release of inorganics constituents from leached biomass during thermal conversion. **Energy & Fuels**, v. 13, n. 4, p. 860-870. 1999.
- ELOY, E.; SILVA, D. A.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BEHLING, A.; ELLI, E.; MONTEIRO, G. C. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de Mimosa scabrella Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p.38-46. 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p38-46
- GOMES, T. C.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; JÚNIOR PEREIRA, A. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37-46. 2014.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Outlook 2013**. Capítulo 6. 2013. Disponível em: <http://goo.gl/X7HY5U>. Acesso em: 30 nov. 2014
- JENKINS, B. M.; BAXTER, L. I.; MILES JR, T.R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p.17-46. 1998.
- MILES, T. R., MILES JR., T.R., BAXTER, L.L., BRYERS, R.W., JENKINS, B.M. AND ODEN, L.L. Alkali deposits found in biomass power plants: a preliminary investigation of their extent and nature. **National Renewable Energy Laboratory**. Golden, CO. 1996.
- MINGLE, J. G.; BOUBEL, R. W. Proximate Fuel Analysis of Some Western Wood and Bark. **Wood Science**, v. 1, n. 1, p. 29-36. 1968.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012. **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE. 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. Curitiba, PR. 2009.
- MUNIR, S.; NIMMO, W.; GIBBS, B. M. Potential Slagging and Fouling Problems associated with Biomass-Coal blends in Coal-fired Boilers. **Journal of Pakistan Institute of Chemical Engineers**, v. 38, n. 1, p. 1-11. 2010.
- NETTO, F. G. B.; OLIVEIRA, A. G. P.; COUTINHO, H. W. M. A.; NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética de biomassas amazônicas. **Encontro de energia no meio rural**, n.6, Campinas. 2006.
- PRONOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 375-383. 2005.
- PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-307. 2011.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalipto spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149. 2013.

PROTÁSIO, T.P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123. 2014.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106. 2005.

SILVA, D.A.; ALMEIDA, V.C.; VIANA, L.C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568. 2014.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and application**. London: Academic Press, p.293. 1993.

STCP. Otimização da gestão de resíduos e o desenvolvimento florestal. **II Encontro Nacional de Gestão de Resíduos – ENEGER**. Curitiba. 2011.

STEENARI B. M.; LINDQVIST O. Stabilisation of biofuel ashes for recycling to forest soil. **Biomass and Bioenergy**, v. 13, n. 1. p. 39-50. 1997.

TILLMAN, D.A.; HARDING, N.S. **Fuels of Opportunity: Characteristics and Uses in Combustion Systems**. United Kingdom: Elsevier, 2004.

VAMVUKA, D.; KAKARAS, E. Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 570–581. 2011.

VAMVUKA, D.; TRIKOUVERTIS, M.; PENTARI, D.; ALVIZOS, G. Evaluation of ashes produced from fluidized bed combustion of residues from oranges plantations and processing. **Renewable Energy**, v. 72, p. 336-343. 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.