

CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL DE FÁBRICA DE PAPEL-CARTÃO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Waldir Nagel Schirmer*
Italo Tadeu Machado Ferreira**
Camilo Bastos Ribeiro***
Guilherme Pozzobom Pavanello****
Gilmara de Oliveira Machado*****
Paulo Rogério Pinto Rodrigues*****

RESUMO: Um dos problemas da indústria de papel e celulose é a disposição de resíduos sólidos em aterros industriais, pela escassez de áreas disponíveis para esta finalidade e ao impacto ambiental gerado. Uma das formas de avaliar o potencial energético de materiais celulósicos residuais é pela determinação do seu poder calorífico. Esta pesquisa teve como objetivo caracterizar os resíduos celulósicos de uma fábrica de papel-cartão por análise imediata e análise elementar, para estimar o poder calorífico e avaliar o potencial de aproveitamento energético na combustão misturada com cavacos na fornalha de caldeira. Foram analisados os combustíveis normalmente queimados na caldeira de biomassa para geração de vapor: cavacos de madeira de pinus, cascas de madeira de pinus e os resíduos gerados na fabricação de papel-cartão: fibras e fiapos de madeira da fabricação de pasta mecânica de madeira, fibras da estação de tratamento de efluentes - ETE e cinzas da caldeira. Os resíduos celulósicos fibras da ETE, fibras e fiapos de madeira apresentaram potencial para utilização energética, desde que submetidos a processo de secagem para redução da umidade e aumentar o poder calorífico. As cinzas da caldeira tem poder calorífico residual podendo ser reaproveitadas na combustão com cavacos de madeira.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável; Secagem; Sustentabilidade.

* Docente Associado do curso de Engenharia Ambiental e Mestrados em Bioenergia e Engenharia Sanitária e Ambiental; Doutor em Engenharia Ambiental pela UFSC, Brasil. E-mail: wanasch@hotmail.com

** Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil.

*** Mestre em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Brasil.

**** Mestre em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Brasil.

***** Docente Adjunto D na Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Brasil.

***** Docente Associado C da Universidade Estadual do Centro Oeste (PR), Brasil.

CHARACTERIZATION OF RESIDUAL BIOMASS FROM A CARD STOCK FACTORY TO PRODUCE ENERGY

ABSTRACT: One of the problems in the paper and cellulose industry is the disposal of solid wastes in industrial pits due to the lack of proper areas and the impact on the environment. The energy potential of waste cellulose materials measures their calorific power. Current research characterizes cellulose wastes from a card stock factory by immediate and element analysis to stimulate the calorific potential and evaluate the capacity of energy profit by combustion mixed to wooden chips in an industrial oven. Fuels usually burnt in the biomass boiler for the generation of steam were analyzed: pine chips, pinus bark and wastes from card stock manufacture; wood fibers retrieved from timber in the manufacture of wood paste, fibers from the effluent treatment station (ETE) and ashes. Cellulose wastes from ETE fiber, wooden fibers and chips had a high energy potential after drying process for the decrease of humidity and increase in calorific potential. Oven ashes also have calorific potential and may be reused in combustion with wooden chips.

KEY WORDS: Renewable energy; Drying; Sustainability.

INTRODUÇÃO

A principal fonte de energia consumida mundialmente provém de combustíveis fósseis, da combustão de derivados do petróleo, carvão mineral e gás natural e apenas uma pequena parte da energia consumida provém de fontes renováveis. Nesse sentido, cabe ressaltar que o Brasil possui uma matriz energética diversificada. Em 2014, a participação de renováveis manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com 39,4%, enquanto a média mundial está entre 13 e 14% (MME, 2015). Dentre as fontes primárias renováveis destaca-se a biomassa, utilizada na combustão direta para geração de vapor e energia elétrica por cogeração, ou como matéria-prima na geração de energia renovável secundária, na produção de biogás e gás de pirólise.

A energia proveniente de biomassa, além de ser de fonte renovável, é considerada limpa por reduzir emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, portanto a biomassa pode se destacar no cenário energético global (BASU,

2010). A biomassa pode ser definida como “recursos naturais que dispõem de bioenergia e que podem ser processados para fornecer formas bioenergéticas mais elaboradas e adequadas para o uso final” (BNDES, 2008). A biomassa provém de base florestal, da agricultura ou de resíduos florestais e agrícolas. É fonte primária, quando o material é utilizado para fins energéticos sem processamento e, de fonte secundária, quando derivada de processo de industrialização agrícola ou de madeira (PANOUTSOU, 2011).

Uma vantagem considerável dos resíduos florestais é que uma grande quantidade destes resíduos é gerada pela indústria madeireira e de papel e celulose, sendo imediatamente utilizada por estas indústrias, mas o potencial de aproveitamento é consideravelmente maior (ROSILLO-CALLE, 2004). Na indústria, representada por empresas do setor de árvores plantadas, 65,8% dos resíduos são destinados para geração de energia, por meio da queima em caldeiras que geram vapor e, eventualmente, energia elétrica para o processo produtivo, eliminando a utilização de combustível fóssil (IBÁ, 2016).

A biomassa é aproveitada de duas formas, a tradicional e a moderna: a utilização tradicional da biomassa constitui a combustão direta de lenha, resíduos animais e carvão. A utilização da biomassa moderna envolve tecnologias como combustíveis líquidos sintetizados a partir de materiais celulósicos, geração e cogeração do biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos, sistemas de aquecimento pela combustão de peletes de madeira e outras tecnologias (IRENA, 2015).

Os fatores que influenciam na escolha do processo de conversão da biomassa são tipo e quantidade de biomassa, a forma de energia desejada, os requisitos do produto final bem como exigências ambientais, fatores econômicos e fatores específicos de projeto (McKENDRY, 2002).

A combustão direta consiste na queima do combustível (biomassa), na presença de oxigênio (comburente) e um iniciador da combustão (fogo ou chama), para liberar energia na forma de calor. Nesse caso, o poder calorífico indica a quantidade de energia liberada na queima completa por quilograma de combustível e é fortemente influenciado por sua umidade; quanto mais seca estiver a biomassa, mais energia para o meio será liberada na forma de calor. Na combustão, a energia

química armazenada na biomassa é convertida em calor o qual é utilizado para realizar trabalho mecânico ou eletricidade por meio de fornos, caldeiras, turbinas a vapor e turbo-geradores etc. Durante a combustão da biomassa, a temperatura dos gases é de 800 a 1000°C, sendo viável para biomassa com teor de umidade até 50%, a não ser que a biomassa seja previamente seca (McKENDRY, 2002). Na biomassa sólida (florestal, resíduos agrícolas, resíduos urbanos etc.), as propriedades físicas mais importantes relacionadas à sua utilização para fins energéticos são o conteúdo de umidade residual (na base úmida) e sua densidade energética (COUTO et al., 2004).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar os resíduos celulósicos de uma fábrica de papel-cartão localizada na região Centro-Oeste do Estado do Paraná, por análise imediata e análise elementar, para estimar o poder calorífico e avaliar o potencial de aproveitamento energético na combustão misturada com cavacos normalmente utilizados na combustão para geração de vapor na caldeira de biomassa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 BIOMASSA E RESÍDUOS CELULÓSICOS GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL-CARTÃO

O processo para fabricação de papel-cartão utiliza biomassa para geração de vapor, por meio da queima de cavacos de madeira de pinus adquiridos de terceiros e produzidos na indústria do estudo. A fabricação do papel-cartão inicia com o recebimento de toras de pinus com diâmetro de 8 a 20 cm para descascamento. As toras descascadas seguem para a fabricação de pasta mecânica de madeira e as toras que não servem para fabricação de pasta são transformadas em cavacos próprios de madeira (material A) para queima na caldeira de biomassa. A casca de madeira (material C) removida das toras também é queimada na caldeira misturada com cavacos de terceiros (material B) para geração de vapor. As toras descascadas são transportadas para a fábrica de pasta mecânica, para fabricação de pasta de madeira nos desfibradores de pedra. A pasta de madeira em suspensão é bombeada para peneiras classificatórias para separar fibras e fiapos (material D), lascas e pequenos

pedaços de madeira, que não servem para fabricação do papel-cartão, sendo enviados para queima na caldeira de biomassa com cerca de 80% de umidade. A pasta é processada em depuradores centrífugos que rejeitam parte das fibras não totalmente desfibradas e outros contaminantes, como pequenos pedaços de casca e areia, que são descartadas na canaleta de efluente, constituindo o efluente líquido da área da pasta mecânica. Os rejeitos de tanques de água e massa de várias etapas do processo também vão para canaletas de efluentes e contêm fibras e partículas finas de madeira que não ficaram retidos no papel-cartão. Estas fibras são removidas da corrente de efluentes por meio de processos de flotação e centrifugação, dando origem ao resíduo celulósico denominado fibras da ETE (material E).

A caldeira de biomassa tem capacidade de produção de vapor de 25 toneladas de vapor por hora a 12 kgf/cm² de pressão e temperatura de vapor saturado de 183,2°C. O consumo médio de biomassa (cavacos, cascas e fibras e fiapos) na combustão é de 143 toneladas de cavacos por dia, para produção de 497 toneladas de vapor, utilizado para secar o papel-cartão por meio de cilindros secadores na máquina de papel. Os gases de combustão da caldeira são removidos pelo ventilador de exaustão, com capacidade para 8800 m³/h a 180°C e pressão de 240 milímetros de coluna de água - mmca. O rejeito da combustão da biomassa na caldeira é extraído pelo fundo da fornalha, sendo peneirado para separar em duas frações; cinzas que ficaram retidas na peneira, denominadas cinzas (material F) e cinzas que passaram pela peneira, denominadas cinzas peneiradas (material G).

Para condução deste estudo, as amostras de materiais combustíveis e resíduos coletados na indústria (identificados de A a G) foram caracterizadas por análise imediata e por análise elementar, para estimativa do poder calorífico por meio de equações de correlação.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS POR ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata de um combustível, em base seca, fornece a porcentagem de material volátil, de cinzas e de carbono fixo.

As amostras de resíduos foram analisadas no laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da Unicentro, para determinação da análise

imediate, (determinação dos teores de voláteis %V, cinzas %A e de carbono fixo %CF), conforme metodologia para análise imediata de carvão vegetal, NBR 8112 (ABNT, 1986).

A determinação da umidade se fez necessária para que os teores de %V, %A e %CF fossem determinados em base seca. Uma amostra de massa aproximada de 1 g, com granulometria de 42 a 60 *mesh*, foi seca à temperatura de $100 \pm 3^{\circ}\text{C}$, até obtenção de massa constante. Todas as análises foram realizadas em triplicata, utilizando-se da Equação 1 para cálculo da umidade percentual.

$$\%U = \left(\frac{mi - ms}{mi} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

%U: umidade da amostra, %

mi: massa inicial da amostra, g

ms: massa da amostra seca, g

O teor de voláteis (%V) foi obtido após pirólise na mufla a 600°C por 10 min e calculado conforme Equação 2.

$$\%V = \frac{(mm - mc)}{mm} \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

%V: teor de voláteis, %

mm: massa aproximada de 4,0 g da amostra antes da pirólise na mufla, g

mc: massa da amostra após pirólise, g.

O teor de cinzas (%A) foi determinado pela quantificação do resíduo após pirólise a 700°C por 6 horas, na mufla e calculado pela Equação 3.

$$\%A = 100 \cdot \left(\frac{mr}{ms} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

%A: teor de cinzas, %

ms: massa aproximada de 4,0 g de amostra seca antes da pirólise, g

mr: massa da amostra após pirólise, g

O teor de carbono fixo (%CF) é uma medida indireta, obtido a partir dos teores de voláteis e de cinzas, pela Equação 4.

$$\%CF = 100 - (\%A + \%V) \quad (\text{Equação 4})$$

Utilizou-se o Minitab® para analisar os resultados através de Anova – Análise de Variância, pelo teste de Tukey com nível de significância de 5% e verificar se há diferença estatística entre as médias dos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas das amostras.

2.3 ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA

O poder calorífico superior (PCS) de um combustível é a quantidade de energia total liberada na combustão completa por unidade de massa, a volume constante, considerando que é condensada a água de formação (água formada pela oxidação do hidrogênio molecular) e da umidade da biomassa. O poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado na combustão por unidade de massa de combustível, isto porque a água formada na combustão do hidrogênio não é condensada (DOAT, 1977).

O PCS de combustíveis sólidos pode ser estimado por meio de análise imediata utilizando-se a Equação 5, sendo, %V o teor de voláteis, %A o teor de cinzas e %CF o teor de carbono fixo (PARIKH et al., 2005).

$$PCS \left(\frac{kcal}{kg} \right) = 84,5104 \cdot \%CF + 37,2601 \cdot \%V - 1,8642 \cdot \%A \quad (\text{Equação 5})$$

O PCI considera que a energia consumida na evaporação da água de formação é diminuída do PCS. O poder calorífico útil (PCU) é a quantidade líquida

de calor liberado (PCS), descontada a quantidade de calor para evaporação da água de formação e da água da umidade do combustível (BRITO, 1993, apud GONÇALVES et al., 2009). Desta forma, o PCU é a quantidade de calor útil liberado na combustão, utilizado para troca térmica e geração de vapor na caldeira.

O PCI e PCU foram calculados utilizando-se as Equações 6 e 7 (BRITO, 1993, apud GONÇALVES et al., 2009), respectivamente.

$$PCI \left(\frac{kcal}{kg} \right) = PCS - \left[600 \cdot \left(\frac{9 \cdot \%H}{100} \right) \right] \quad (\text{Equação 6})$$

$$PCU \left(\frac{kcal}{kg} \right) = PCI \cdot \left[\frac{(100 - \%U)}{100} \right] - (6 \cdot \%U) \quad (\text{Equação 7})$$

em que:

PCS: poder calorífico superior, base seca, kcal/kg

PCI: poder calorífico inferior, base seca, kcal/kg

PCU: poder calorífico útil, base úmida, kcal/kg

%H: teor de hidrogênio determinado pela análise elementar, %

%U: teor de umidade, %

2.4 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS POR ANÁLISE ELEMENTAR

A análise elementar fornece a composição de um combustível em termos percentuais de seus elementos básicos, C, H, N, S e O, sem o teor de umidade e de cinzas incluídos, de forma que é necessário fazer a conversão para a base úmida para que a soma dos termos da análise elementar, mais a umidade e cinzas, seja igual a 100% (BASU, 2010).

As amostras de combustíveis e resíduos identificadas de A a G foram analisadas no EuroVector CHNS-O, EA3000 *Elemental Analyzer*. Foram determinados os percentuais de carbono (%C), hidrogênio (%H), nitrogênio (%N) e enxofre (%S). O teor de oxigênio (%O) foi determinado por diferença, considerando-se que esses elementos compõem 100% da amostra. Os teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) são menores que uma parte por milhão (1,0 ppm) na primeira análise elementar,

ou seja, não foram detectados no equipamento EuroVector. Para confirmação dos resultados, foi realizada uma segunda análise elementar por EDS, utilizando-se o equipamento VEGA3 TESCAN.

A composição de um combustível sólido pode ser expressa na base úmida (tal qual recebido), na base seca, ou na base combustível. A Equação 8 resume a composição de um combustível na base úmida, em função da análise elementar (LORA et al., 2012).

$$\%C^u + \%H^u + \%N^u + \%S^u + \%O^u + \%U^u + \%A^u = 100\% \text{ (Equação 8)}$$

A Equação 9 apresenta a composição de um combustível na base seca,

$$\%C^s + \%H^s + \%N^s + \%S^s + \%O^s + \%A^s = 100\% \text{ (Equação 9)}$$

A composição do combustível, na base combustível, é expressa sem umidade e cinzas, conforme Equação 10.

$$\%C^c + \%H^c + \%N^c + \%S^c + \%O^c = 100\% \text{ (Equação 10)}$$

A partir dos resultados de análise elementar na base combustível (obtidos pelo EuroVector CHNS-O), utilizaram-se os resultados de teor de cinzas da análise imediata, para converter os resultados de base combustível para base seca, por meio da Equação 11 (SOLER e LORA, 1991, apud LORA et al., 2012).

$$\%C_s = \%C_c \cdot \left(\frac{100 - \%A}{100} \right) \text{ (Equação 11)}$$

em que,

$\%C_c$: teor de carbono na base combustível, %

$\%C_s$: teor de carbono na base seca, %

$\%A$: teor de cinzas, %

Da mesma forma, os teores de $\%N^c$, $\%H^c$, $\%S^c$ e $\%O^c$ (todos na base combustível) foram convertidos de base combustível para base seca.

2.5 ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) DAS AMOSTRAS A PARTIR DA ANÁLISE ELEMENTAR

Foi utilizada a Equação 12, desenvolvida pela Agência Internacional de Energia, que fornece uma boa estimativa do poder calorífico superior do combustível na base seca com erro médio de 1,8%, menor que o erro obtido em calorímetro (LORA et al., 2012).

$$PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 0,3491 \cdot \%C^S + 1,1783 \cdot \%H^S + 0,1005 \cdot \%S^S - 0,0151 \cdot \%N^S - 0,1034 \cdot \%O^S - 0,0211 \cdot \%A^S \quad (\text{Equação 12})$$

em que:

PCS: poder calorífico superior na base seca, MJ/kg,

%C^s: teor de carbono na base seca, %

%H^s: teor de hidrogênio na base seca, %

%S^s: teor de enxofre na base seca, %

%N^s: teor de nitrogênio na base seca, %

%O^s: teor de oxigênio na base seca, %

%A^s: teor de cinzas na base seca, %

A partir de resultados de análise elementar, calculou-se o PCS das amostras (A a G), utilizando-se a Equação 12. Os valores de PCI e PCU das amostras foram obtidos a partir do PCS, calculados por meio das Equações 6 e 7, utilizando-se o teor de hidrogênio (%H) da análise elementar e o teor de umidade médio das amostras, tal como recebidas na fábrica e após a secagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de análise imediata para os materiais do estudo e a Tabela 2, os valores de referência de biomassa celulósica de origem florestal.

Tabela 1. Análise imediata dos materiais do estudo

Material	Voláteis	Cinzas	Carbono fixo
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
(A) Cavacos próprios	84,2 ± 0,23 a (0,27%)	1,0 ± 0,13 e (12,91%)	14,8 ± 0,23 e (1,56%)
(B) Cavacos de terceiros	71,6 ± 0,74 c (1,03%)	3,4 ± 0,27 de (8,00%)	25,0 ± 0,74 c (2,94%)
(C) Cascas de pinus	68,1 ± 0,86 d (1,27%)	10,2 ± 0,41 c (4,01%)	21,7 ± 0,86 d (3,98%)
(D) Fibras e fiapos	82,5 ± 0,61 b (0,74%)	6,1 ± 0,11 d (1,79%)	11,5 ± 0,61 f (5,29%)
(E) Fibras da ETE	68,3 ± 0,61 d (0,90%)	11,5 ± 0,29 c (2,54%)	20,2 ± 0,61 d (3,03%)
(F) Cinzas	12,6 ± 0,56 e (4,46%)	29,0 ± 2,65 b (9,14%)	58,4 ± 0,56 a (0,96%)
(G) Cinzas peneiradas	10,0 ± 0,52 f (5,16%)	39,5 ± 0,79 a (1,99%)	50,5 ± 0,52 b (1,02%)

Nota: No teste de Tukey, letras coincidentes indicam que as médias são iguais e letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente, com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) e entre parênteses indica-se o coeficiente de variação (CV).

Tabela 2. Valores de referência de análise imediata, análise elementar e o poder calorífico superior medido e calculado de pinus taeda, eucaliptus bentamii e eucaliptus macarthurii

Material	Carb. Fixo	Vol.	Cinz.	C	H	N	S	O	PCS med.	PCS calc.	Referência
Cavacos de madeira	23,5	76,4	0,1	48,1	5,99	0,08	0,0	45,8	19,9	20,2	Parick et al., (2005)
Madeira de Pinus	15,7	73,6	11,3	-	-	-	-	-	16,6	16,9	Parick et al., (2005)
casca e desbastes de pinus taeda	33,9	65,7	0,4	56,3	5,6	0,0	0,0	37,7	21,7	22,2	Parick et al., (2005)
Eucaliptus bentamii	16,3	83,3	0,4	49,2	5,0	-	0,16	45,6	19,7	-	Pirraglia et al., (2012).
Eucaliptus macarthurii	14,1	85,3	0,6	49,1	4,9	-	0,11	45,9	23,1	-	Pirraglia et al., (2012).

A observação da Tabela 1 indica dois grupos distintos: as amostras de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C), fibras e fiapos (D) e fibras da ETE (E) que apresentaram alto teor de voláteis, baixo teor de cinzas e de carbono fixo. Adicionalmente, esses resultados são satisfatórios, uma vez que essas três variáveis influenciam positivamente no PC como indica a Equação 5. Os resultados das amostras de A a D estão de acordo com valores obtidos da análise imediata de resíduos de madeiras, obtidos por ADEKIIGBE (2012).

Já as amostras de cinzas (F) e de cinzas peneiradas (G) apresentaram baixo teor de voláteis, alto teor de cinzas e de carbono fixo, como já era esperado. Esses resultados devem-se ao fato de que os combustíveis à base de biomassa (amostras de A a E) convertem em média, no processo de queima, três quartos de sua massa em compostos voláteis, gerando chamas largas acompanhadas de maior liberação de calor para troca térmica e produção de vapor na caldeira. Diante disso, essas duas amostras terão seu poder calorífico reduzido, pelo fato do teor de cinzas influenciar negativamente, conforme Equação 5.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados da análise elementar na base combustível.

Tabela 3 - Análise elementar dos materiais na base combustível.

Identificação	Material	Análise elementar na base combustível (% m/m)				
		C	H	N	S	O
A	Cavacos próprios	57,34	5,39	0,00	0,03	37,24
B	Cavacos terceiros	52,09	3,44	0,00	0,03	44,44
C	Cascas de madeira	52,25	7,63	0,00	0,03	40,09
D	Fibras/fiapos	46,01	7,57	0,00	0,02	46,40
E	Fibras da ETE	39,72	6,19	0,00	0,03	54,06
F	Cinzas	51,24	< 1,00	0,00	0,22	47,54
G	Cinzas peneiradas	48,45	< 1,00	0,00	0,20	50,35

* Teores de N e S obtidos por MEV no aparelho VEGA3 TESCAN.

Os resultados obtidos na Tabela 3 foram convertidos para base seca utilizando-se a equação (11) e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Análise elementar dos materiais convertidos para base seca, com teores de cinzas obtidos da análise imediata

Identificação	Material	Análise elementar na base seca (% m/m)				
		H	N	S	O	%Cinzas
A	Cavacos próprios	5,34	0,00	0,03	36,87	1,00
B	Cavacos terceiros	3,32	0,00	0,03	42,93	3,40
C	Cascas de madeira	6,85	0,00	0,03	36,00	10,20
D	Fibras/fiapos	7,11	0,00	0,02	43,57	6,10
E	Fibras da ETE	5,48	0,00	0,03	47,84	11,50
F	Cinzas	0,71	0,00	0,16	33,75	29,00
G	Cinzas peneiradas	0,61	0,00	0,12	30,46	39,50

Os elementos químicos constituintes da biomassa que contribuem para a combustão gerando calor são hidrogênio, carbono e enxofre, conforme indica a Equação 12. Como o teor de enxofre na madeira geralmente é muito baixo, menor que 1,0%, os teores de carbono e hidrogênio definem a qualidade do combustível. Já a umidade, cinzas, oxigênio e nitrogênio constituem a fração incombustível e não fornecem calor durante a combustão (ISMAILA et al., 2013).

Ramos e Paula et al., (2011) observaram alta correlação positiva do poder calorífico superior com teor de voláteis (+0,7525), com o teor de carbono (+0,7547) e com o teor de hidrogênio (+0,7604) e, alta correlação negativa do poder calorífico superior com o teor oxigênio (-0,7643) para resíduos agrícolas celulósicos (casca de arroz, palha de milho, caule de café, podas de soja e de feijão, bagaço e palha de cana, resíduos e serragem de madeira). As amostras de A a E apresentam alto teor de voláteis (Tabela 1), alto teor de carbono e de hidrogênio (Tabela 4), justificando o maior poder calorífico calculado, enquanto que as amostras F e G apresentam menores teores de voláteis, de carbono e de hidrogênio e alto teor de cinzas, resultando no menor poder calorífico calculado.

As amostras de A a E apresentaram menor baixo teor de enxofre e as amostras de F a G apresentaram maior teor de enxofre, o que contribui para maior geração de

SO₂ durante a combustão destes materiais. As emissões de SO₂ convertido durante a combustão dependem de alguns parâmetros como o teor de enxofre, as espécies de enxofre, temperatura das reações, entre outros (ZHAO et al., 2016). Assim, o maior teor de enxofre pode estar diretamente relacionado com as maiores concentrações de óxidos de enxofre emitidos na atmosfera, fato preocupante pelo poder reativo e corrosivo de compostos dessa natureza (CHEN et al., 2008; MANAHAN, 2005). Nesse caso, as amostras de F a G podem apresentar maior contribuição na geração de SO₂ durante a combustão dos materiais analisados. Adicionalmente, a presença de enxofre gera problemas de corrosão nos equipamentos como caldeira, tubulações e filtros (RAMOS; PAULA et al., 2011).

Com o auxílio da equação (12), foram calculados os PCS das amostras a partir dos teores de cada elemento em base seca, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Comparação do poder calorífico superior (PCS), estimados a partir dos resultados de análise imediata e análise elementar na base seca

Ident	Material	PCS (Análise imediata)		PCS (Análise elementar)	
		MJ/kg (*)	kcal/kg	MJ/kg (*)	kcal/kg
A	Cavacos próprios	18,35	4386,2	22,27	5323,6
B	Cavacos terceiros	19,98	4774,2	16,97	4056,8
C	Cascas de madeira	18,21	4352,3	20,52	4903,9
D	Fibras/fiapos	16,88	4034,5	18,83	4499,4
E	Fibras da ETE	17,70	4230,5	13,54	3236,0
F	Cinzas	22,39	5350,8	9,45	2258,7
G	Cinzas peneiradas	19,11	4566,7	6,97	1667,0

* Para converter de MJ/kg para kcal/kg, multiplicou-se o valor em MJ/kg por 239.

É notável que os elementos carbono, hidrogênio e enxofre influenciam positivamente no PCS, ou seja, quanto maior o teor desses elementos, maior será o PCS. Contudo, cinzas, oxigênio e nitrogênio influenciam negativamente no PCS, logo, quanto maior o teor desses elementos e de cinzas, menor o PCS. O baixo PCS de cinzas e cinzas peneiradas estimadas pela análise elementar é resultado do menor

teor de carbono destes materiais, comparados às demais amostras e estão de acordo com resultados obtidos por Ismaila et al. (2013).

Correlações do poder calorífico com análise imediata apresentam maior desvio do que correlações do poder calorífico com análise elementar (PICHAI et al., 2013). Em função disto, no estudo de viabilidade de reaproveitamento energético dos resíduos foi utilizada a análise elementar para cálculo do poder calorífico pelo fato deste estimar de forma mais precisa a composição da biomassa do que a análise imediata.

Como o PCS é um valor teórico, é necessário converter o PCS em PCI e posteriormente em PCU, para levar em conta a situação real em que se encontra a biomassa, para então avaliar a viabilidade energética. Deste modo, o PCI contabiliza a energia gasta para formação da água e o PCU desconta a energia gasta para evaporar a água (de umidade) contida na biomassa. Na Tabela 6 são apresentados os resultados do PCS, PCI e PCU com base na umidade natural dos combustíveis.

Tabela 6. Cálculo do PCI, PCU de cada combustível a partir da umidade que se apresentam

Ident	Material	Umid %	PCS kcal/ kg	PCI kcal/ kg	PCUum kcal/kg
A	Cavacos próprios	38,5	5323,6	5035,5	2868,2
B	Cavacos terceiros	53,4	4056,8	3877,4	1484,9
C	Cascas	57,4	4903,9	4533,9	1589,5
D	Fibras/fiapos	80,0	4499,4	4115,6	343,1
E	Fibras da ETE	55,0	3236,0	2940,1	993,1
F	Cinzas	10,3	2258,7	2220,4	1931,0
G	Cinzas peneiradas	4,7	1667,0	1634,3	1528,6

* PCI calculados pela Equação 6, PCU calculados pela Equação 7.

As amostras D e E, na umidade que se apresentam, não são viáveis para utilização como combustível, uma vez que o PCU das fibras e fiapos é 88% mais baixo que o PCU dos cavacos próprios. O PCU de fibras da ETE é 65,5% mais baixo que o de cavacos próprios. O PCU mais baixo é devido ao teor de umidade destes materiais, uma vez que seriam consumidos 3.772,5 kcal/kg (material D) e 1.947

kcal/kg (material E) para evaporar água contida nestes resíduos, antes do início do processo de combustão.

A utilização de biomassa por combustão é dependente da umidade do combustível. A redução de umidade da biomassa é indicada para aumentar a eficiência dos processos de combustão (ROOS, 2008). Deste modo, seria indicado submeter os materiais (D e E) à secagem antes de utilizá-los como combustível para queima com boa eficiência energética.

Na Tabela 7 são apresentados o PCS, PCI e PCU das amostras, considerando-se que os materiais D e E foram secos a 20% de umidade.

Tabela 7. Cálculo do PCI, PCU de fibras e fiapos e de lodo da ETE, considerando que os materiais D e E foram submetidos à secagem até 20% de umidade

Ident	Material	Umid %	PCS kcal/kg	PCI kcal/kg	PCUsec kcal/kg
A	Cavacos próprios	38,5	5323,6	5035,5	2865,8
B	Cavacos terceiros	53,4	4056,8	3877,4	1414,8
C	Cascas	57,4	4903,9	4533,9	1710,3
D	Fibras/fiapos	20,0	4499,4	4115,6	3172,5
E	Fibras da ETE	20,0	3236,0	2940,1	2232,1
F	Cinzas	10,3	2258,7	2220,4	1931,0
G	Cinzas peneiradas	4,7	1667,0	1634,3	1528,6

As fibras e fiapos (D) com 20% de umidade apresentam PCU 10% maior do que o PCU dos cavacos próprios. Adicionalmente, fibras da ETE (E) com 20% de umidade, apresenta PCU 37% maior do que o PCU dos cavacos de terceiros e 22% menor do que os cavacos próprios, sendo possível o reaproveitamento destes resíduos nesta umidade para redução do consumo de cavacos normalmente utilizados.

4 CONCLUSÕES

A caracterização de biomassa combustível (cavacos e cascas de madeira) e dos resíduos celulósicos de fábrica de papel-cartão (fibras e fiapos de madeira, fibras da estação de tratamento de efluente) por meio da composição elementar, análise imediata e do teor de umidade, permitiu estimar o poder calorífico e afirmar que há potencial de reaproveitamento dos resíduos celulósicos na combustão misturada com a biomassa normalmente utilizada.

A comparação do poder calorífico superior de cavacos próprios (5.323,6 kcal/kg) e cavacos de terceiros (4.056,8 kcal/kg), com o PCS de cascas de madeira (4.903,9 kcal/kg), indica que este material é importante fonte de energia para combustão, reduzindo a demanda de aquisição de cavacos de terceiros.

O poder calorífico útil de fibras e fiapos de madeira (3.172,5 kcal/kg) e fibras da ETE (2.232,1 kcal/kg) permite concluir que os resíduos celulósicos podem ser reaproveitados como combustível na caldeira, pela queima misturados com cavacos próprios, de terceiros e cascas de madeira, desde que previamente secos a 20% de umidade.

As cinzas (F) e cinzas peneiradas (G) apresentaram poder calorífico residual de 1.931,0 kcal/kg e 1.528,6 kcal/kg, respectivamente, podendo ser reutilizadas na combustão misturada com a biomassa. No entanto, devido sua granulometria fina e maior teor de inertes (cinzas incombustíveis), a fração de cinzas peneiras (G) não é indicada para reaproveitamento.

A secagem demonstra ser uma forma efetiva para melhorar as propriedades energéticas dos resíduos celulósicos pela redução da umidade e, conseqüentemente, pelo aumento do poder calorífico, permitindo seu reaproveitamento como combustível.

REFERÊNCIAS

ADEKIIGBE, A. Determination of Heating Value of Five Economic Trees Residue as a Fuel for Biomass Heating System. *Nature and Science*, Nigeria, v. 10, n. 10, p. 26-29, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencepub.net/nature>>. Acesso em: 21 dez. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR – 8112/86**. Carvão Vegetal - Análise Imediata. Rio de Janeiro, Outubro 1986. 6 p.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES (Coord). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. USA: Elsevier: 364 p. 2010.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba, **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993, p. 280-282.

CHEN Z.Y.; PERSSON D.; LEYGRAF, C. Initial NaCl-particle induced atmospheric corrosion of zinc—Effect of CO₂ and SO₂. **Corrosion Science**, v. 50, p. 111-123, 2008.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, v.1, n. 1, p. 71-92, 2004.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois Forêts des Tropiques**, n. 172, p. 33-48, 1977.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P; LEÃO, A. L Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Resíduos sólidos**. abr. 2015. Disponível em: <<http://iba.org/pt/sustentabilidade/residuos-solidos>>. Acesso em: 07 set. 2016.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY – IRENA. REMAP 2030. The importance of modern bioenergy. The importance of bioenergy for meeting global renewable energy targets. Disponível em: <<http://irena.org/remap/REmap>>

FactSheet-3-Modern%20Bioenergy.pdf> . Acesso em: 15 nov. 2015.

ISMAILA, A.; ZAKARI, I.Y.; NASIRU, R.; TIJJANI, B.I.; ABDULLAHI, I.; GARBA, N.N. Investigation on biomass briquettes as energy source in relation to their calorific values and measurement of their total carbon and elemental contents for efficient biofuel utilization. **Advances in Applied Science Research**, v. 4, n. 4, p. 303-309, 2013. Pelagia Research Library. Disponível em: <www.pelagiaresearchlibrary.com> . Acesso em: 21 dez. 2015.

LORA, E. E. S.; ROCHA, M. H.; VENTURINI, O. J.; COBAS, V. R. M.; SOTOMONTE, C. R. Biomassa in natura: combustão e acionadores primários. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 48-172.

MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. 8. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005. 783p.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 47-54, 2002.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balço energético nacional 2015: Ano base 2014**. Empresa de pesquisa energética - EPE. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2015&anoFimColeta=2014>> . Acesso em: 11 out. 2015.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PANOUTSOU, C. Supply of solid biofuels: Potential feedstocks, cost and sustainability issues in EU27. In: GRAMMELIS, P. (Ed.) **Solid biofuels for energy - a lower greenhouse gas alternative**. Greece: Springer-Verlag London Limited, 2011. Cap. 01, p.1-20.

PHICHAI, K.; PRAGROBPONDEE, P.; KHUMPART, T.; HIRUNPRADITKOON, S. Prediction Heating Values of Lignocellulosics from Biomass Characteristics. **International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and**

Metallurgical Engineering, v. 7, n. 7, 2013.

RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

ROOS, C. J. **Biomass drying and dewatering for clean heat and power**. Northwest Combined Heat and Power Application Center. U.S. Department of Energy. Washington, USA, p. 35., 2008.

ROSILLO-CALLE, F. A brief account of Brazil´s biomass energy potential. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 3, p. 225 -236, 2004.

SOLER, P. B.; LORA, E. E. S. **Pruebas de balance térmico em calderas para bagazo**. Santiago de Cuba: Departamento de Termoenergética, Facultad de Ingeniería Mecánica, ISPJAM - Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella, 1991.

ZHAO, B.; SU, Y.; LIU, D.; ZHANG H.; LIU, W.; CUI, G. SO₂/NO_x emissions and ash formation from algae biomass combustion: Process characteristics and mechanisms. **Energy**, v. 113, p. 821-830, 2016.

Recebido em: 17 de fevereiro de 2016

Aceito em: 04 de outubro de 2016