

Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos

Blends of sugarcane bagasse with the mango tree and cashew tree's pruning: properties characterization and investigation of their energy potentials

Marcelo Rodrigues Ponte¹, Antônia Mabrysa Torres Gadelha¹,
Yguatyara de Luna Machado², Ada Amélia Sanders Lopes¹,
Jackson Queiroz Malveira³, Selma Elaine Mazzetto⁴,
Diego Lomonaco⁴, Maria Aleksandra de Sousa Rios²

¹ UNILAB - IEDS – Rodovia CE 060 – km 51, CEP 62785-000, Acarape, Ceará, Brasil
e-mail: marcelorponete@gmail.com, mabrysa_gadelha@hotmail.com, ada@unilab.edu.br

² Universidade Federal do Ceará – GRINTEQUI/DEM/CT – Campus do Pici, Bloco 714, CEP 60.455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

e-mail: yguatyaluna@gmail.com, alexsandrarios@ufc.br

³ Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – Larbio/NUTEC, Pici, CEP 60.440-552, Fortaleza, Ceará, Brasil
e-mail: jackson.malveira@nutec.ce.gov.br

⁴ Universidade Federal do Ceará – LPT/DQOI, Campus do Pici, Bloco 940, CEP 60451-970, Fortaleza, Ceará, Brasil
e-mail: selma@ufc.br, lomonaco@ufc.br

RESUMO

O trabalho apresenta o potencial energético de blendas de bagaço de cana-de-açúcar e podas de mangueira e cajueiro. As amostras foram caracterizadas por meio da determinação do poder calorífico superior, densidade, análise imediata (umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo), análise elementar e termogravimetria. As misturas foram preparadas com diferentes frações em massa. Após avaliação qualitativa e quantitativa das amostras verificou-se quais blendas apresentaram os melhores resultados e, em seguida, os briquetes foram produzidos. As misturas de bagaço de cana:poda de mangueira (frações 50%: 50%), bagaço de cana:poda de cajueiro (frações 50%: 50%) e bagaço de cana:poda de cajueiro:poda de mangueira (frações 50%: 25%: 25%) foram utilizadas na produção dos briquetes. A última parte do trabalho apresenta a diferença entre o potencial energético dos briquetes e do bagaço de cana. A densidade energética dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar e poda de mangueira aumentou de 1,79 para 13,55 (kJ cm⁻³), em relação ao material não compactado. Os briquetes com poda de cajueiro variaram de 1,97 a 12,75 (kJ cm⁻³) e os briquetes de bagaço de cana:poda de cajueiro:poda de mangueira variaram de 2,46 a 12,18 (kJ cm⁻³). O briquete de bagaço de cana apresentou variação de 1,25 para 13,22 (kJ cm⁻³). A investigação do potencial energético de bioprodutos agrícolas (podas de mangueira e cajueiro) em mistura com bagaço de cana-de-açúcar, apresenta à indústria sucroalcooleira uma nova possibilidade de reutilização de resíduos de biomassa para obtenção de energia.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Biomassa; Briquetes; Poda de mangueira; Poda de cajueiro.

ABSTRACT

The work shows the energy potential of blends of sugarcane bagasse with the mango tree and cashew tree's pruning. The samples were characterized by gross calorific value, density, proximate analysis (moisture, ash, volatile matter and fixed carbon), elemental analysis and thermogravimetry. The blends were prepared with different mass fractions. After evaluation of the samples qualitative and quantitative analyses, it was verified which blends showed the better results and then the briquettes were prepared. The blends of sugarcane bagasse:mango tree pruning (fractions 50%:50%), sugarcane bagasse:cashew tree pruning (fractions

50%:50%), and sugarcane bagasse:cashew tree pruning:mango tree pruning (fractions 50%:25%:25%) were used to the briquettes production. The last part of the work shows the difference between the energy potential of the briquettes and the sugarcane bagasse. The energy density of the briquettes of sugarcane bagasse and mango tree pruning increased from 1.79 to 13.55 (kJ cm⁻³), in relation to the uncompacted material. The cashew tree pruning's briquettes varied from 1.97 to 12.75 (kJ cm⁻³), and the briquettes of sugarcane bagasse:cashew tree pruning:mango tree pruning varied from 2.46 to 12.18 (kJ cm⁻³). The sugarcane bagasse briquette showed a variation of 1.25 to 13.22 (kJ cm⁻³). The investigation of the energy potential of agricultural bioproducts (mango and cashew tree's pruning) in mixture with sugarcane bagasse presents to the sugar-alcohol industry a new possibility of reuse of biomass waste to obtain of energy.

Keywords: Sustainability; Biomass; Briquettes; Mango tree pruning; Cashew tree pruning.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da utilização de fontes renováveis de energia com relação às fontes fósseis, faz parte da agenda mundial de sustentabilidade, na qual a biomassa, ao longo dos últimos anos, tem apresentado perfil ascendente, principalmente como combustível em usinas sucroalcooleiras, termelétricas, indústrias de papel e celulose, agentes térmicos e sistemas de cogeração [1].

Nesse contexto, o Brasil ao longo dos últimos anos vem acompanhando a tendência mundial de exploração/utilização dos recursos renováveis, como o crescimento da energia eólica na matriz elétrica brasileira, a implantação de termelétricas a base de biomassa, o avanço na cultura da cana-de-açúcar e a liderança na produção de biocombustível a partir desta fonte, os quais contribuem para promover Desenvolvimento Sustentável [2-5].

De acordo com Ribeiro et al. (2012) [6], o termo biomassa é empregado para descrever a matéria orgânica dos organismos, na qual a de origem vegetal é produzida via fotossíntese, mecanismo em que o gás carbônico (CO₂) é convertido em açúcares, os quais, posteriormente, são convertidos nos polímeros estruturais amido, celulose, hemicelulose e lignina [7]. Quando as ligações entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio são quebradas por combustão, digestão, ou decomposição, estes compostos liberam sua energia química armazenada [8-11] e desta forma, a energia presente na biomassa pode ser transformada em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, por meio de processos de conversão físicos, químicos e biológicos.

Considerado um dos maiores produtores e exportadores agrícola, o Brasil apresenta perspectivas de crescimento de 1,5% ao ano, até 2024, mantendo-se como o maior produtor e exportador mundial de açúcar [12]. A cana-de-açúcar hoje é uma das principais culturas da economia brasileira e tem colaborado para o desenvolvimento do país. O setor sucroalcooleiro utiliza a energia proveniente do bagaço da cana para gerar eletricidade para seu próprio consumo [12, 3].

No que se refere ao agronegócio do caju e da manga, o caju é oriundo de uma atividade cultural que ocupa uma área de 619 mil hectares no Brasil, a qual desse total 99,4% está localizado no Nordeste [13, 14]. Nesta mesma região, em particular nas áreas irrigadas do semiárido, a manga é cultivada. As principais áreas produtoras estão localizadas nos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará [15, 16]. Todos esses produtos agrícolas geram resíduos que precisam ser reutilizados, para garantir o equilíbrio no uso dos recursos naturais. No entanto, devido à sua complexidade e diversidade química, a biomassa oriunda dos resíduos agroindustriais deve ser caracterizada para melhor atribuição do uso final [17-19].

Devido a variabilidade da biomassa, a indicação do melhor processo de aproveitamento energético deve ser apoiada no conhecimento técnico obtido dos procedimentos experimentais como: análise imediata (umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo); densidade; análise elementar, imprescindível para investigação dos elementos químicos; análise termogravimétrica, pela qual se obtém o perfil térmico de degradação e o poder calorífico, referente a quantidade de energia liberada durante a combustão [8, 9, 17-21].

Para melhor adequação da biomassa como combustível, alguns pré-tratamentos podem ser utilizados tendo-se como exemplos: redução de tamanho, secagem e densificação, ajustando-se as características e melhorando-se o rendimento dos processos de conversão térmica subsequentes. No sentido de otimizar os processos de combustão, é possível densificar a matéria orgânica de forma a tornar a biomassa mais homogênea e compacta. A técnica utilizada é a produção de briquetes, na qual combustíveis sólidos são transformados em blocos de forma definida, por meio de um processo físico de compactação [21-28]. Dentre as vantagens apresentadas destaca-se o aumento da densidade energética da biomassa.

Diante do exposto, o trabalho teve por objetivo investigar o potencial energético de briquetes obtidos a partir da mistura de bagaço de cana com os resíduos da poda de mangueira e de cajueiro. A investigação foi realizada pela determinação da análise imediata, densidade, análise elementar, termogravimetria e poder ca-

lorífico superior.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os resíduos agroindustriais: poda do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), poda da mangueira (*Mangifera indica* L.), ambos em composições de galhos e folhas coletados na cidade de Baturité, Ceará, Brasil; e bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), gentilmente cedido por uma indústria localizada no município de Redenção, Ceará, Brasil.

As podas foram coletadas em janeiro de 2014, seus acondicionamentos foram feitos em um container, sob temperatura ambiente, em Fortaleza-Ceará, onde localiza-se a Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (Nutec), sob proteção da radiação solar direta e/ou chuva. O bagaço da cana-de-açúcar foi coletado em julho de 2016, ficando acondicionado em sacos plásticos em uma sala de alvenaria, sob temperatura ambiente. As caracterizações foram realizadas no ano da coleta.

As análises foram executadas de acordo com os procedimentos experimentais das normas ASTM e NBR, como segue: o PCS foi determinado com o auxílio de um calorímetro Ika C1 seguindo as descrições da norma ASTM E711-87 [29]; a densidade a granel (DG) foi determinada de acordo com a NBR ISO 3852 [30]; a densidade aparente (DA) de acordo com a NBR ISO 2420 [31]; a umidade (U) de acordo com a NBR 14929 [32]; cinzas (A), NBR 13999 [33]; materiais voláteis (MV), NBR 8112 [34]; carbono fixo (F), NBR 8112 [34], por diferença; as curvas TG-DTG foram determinadas com o auxílio de um analisador termogravimétrico Mettler Toledo TGA/SDTA85, em atmosfera inerte, seguindo as descrições da norma ASTM E1131-08 [35]; análise elementar (CHN), ASTM D3176-15 [36], com o auxílio de um analisador elementar Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O e densidade energética (DE) – por meio de cálculo –.

Para a redução de tamanho e posterior caracterização, as amostras (obtidas de um processo de poda) foram trituradas com o auxílio de um triturador de material orgânico TR200 Trapp. Posteriormente, o material foi peneirado (peneira Granutest de 18 *mesh*) e acondicionado em saco plástico.

O cálculo da densidade energética foi obtido por manipulação matemática com base no poder calorífico superior (PCS) e nas densidades a granel (DG) e aparente (DA). A densidade energética das amostras (DE_{briquete}) compreende a quantidade de energia por unidade de volume e pode ser utilizada para comparação da eficiência energética destas [22, 37].

A análise imediata corresponde as determinações de umidade (U), cinzas (A), matéria volátil (MV) e carbono fixo (F). A análise elementar determina os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S). O teor de oxigênio (O) é obtido por diferença em relação aos demais elementos e ao teor de cinzas, conforme apresentado por Protásio [22]. Para determinação do perfil térmico de degradação das amostras foram realizadas as análises termogravimétricas (TG), em atmosfera de nitrogênio (N_2).

Para investigação do potencial energético das blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro foram avaliados o poder calorífico superior e a análise imediata nas frações em massa (%:%) apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Frações em massa (%:%) das blendas bagaço de cana-de-açúcar e podas de mangueira e cajueiro.

Blenda	Frações em massa %: %
Bagaço de cana-de-açúcar: poda da mangueira	50%:50%
	25%:75%
	75%:25%
Bagaço de cana-de-açúcar: poda do cajueiro	50%:50%
	25%:75%
	75%:25%
Bagaço de cana-de-açúcar: poda do cajueiro: poda da mangueira	50%:25%:25%
	40%:30%:30%
	60%:20%:20%

Para avaliação do potencial energético das amostras (bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro, blendas e briquetes) adotou-se a escolha dos melhores resultados de acordo com os critérios: maior

valor de PCS, maior valor de F, maior valor de MV e menor valor de A. Para esta avaliação foram gerados gráficos de decisão do tipo radar. Os briquetes foram produzidos com o auxílio de uma prensa hidráulica Marcon MPH-15, aplicando-se uma força de aproximadamente 7,5 (toneladas), adquirindo-se uma pressão de 37,5 (MPa) e tempo de repouso de aproximadamente 5 minutos. Foi utilizado um molde cilíndrico em aço inox, com 5 cm de diâmetro interno. Cada briquete foi formado com 80 g do material *in natura*. Na prensaagem não foram utilizados materiais aglutinantes, nem aquecimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos materiais *in natura*

Os resultados de Umidade foram poda do cajueiro 23,4%; poda da mangueira 10,6% e bagaço de cana-de-açúcar 14,0%. As podas do cajueiro e da mangueira apresentaram valores de umidade que variaram significativamente em relação ao bagaço da cana. Em geral, para a produção de briquetes, prensas de pistão trabalham com biomassas com umidade entre 10-15% e as prensas de extrusão, com umidade entre 8-9% [8]. Assim, para aplicação como biocombustível recomenda-se a inclusão de uma etapa prévia de secagem.

Com relação ao Poder Calorífico Superior, a poda do cajueiro apresentou o maior valor 17,4 (MJ kg⁻¹), seguida pela poda da mangueira 17,0 (MJ kg⁻¹) e bagaço de cana-de-açúcar 15,2 (MJ kg⁻¹). Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de densidade a granel (DG) e densidade energética da biomassa *in natura* (DE_{*in natura*}), cinzas (A), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (F) para as podas de mangueira e cajueiro e para o bagaço de cana. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

Tabela 2: Resultados de densidade a granel e energética, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo para as podas de mangueira e cajueiro e para o bagaço de cana.

Análise	Poda do cajueiro	Poda da mangueira	Bagaço de cana
Densidade a granel (g cm ⁻³)	0,28	0,21	0,08
Densidade energética (kJ cm ⁻³)	4,82	3,62	1,25
Cinzas (A) (%)	4,60	13,50	15,40
Materiais voláteis (MV) (%)	70,10	74,30	69,00
Carbono fixo (F) (%)	24,40	12,20	15,40

De acordo com os resultados, as podas do cajueiro e da mangueira apresentaram uma quantidade de energia por volume – densidade energética – superior ao bagaço de cana-de-açúcar, uma vez que as podas apresentaram valores de densidade a granel superiores ao bagaço de cana. Com relação a composição imediata, foi verificado que o bagaço de cana possui o maior teor de cinzas (A), característica que não é interessante para um biocombustível, pois as cinzas formadas na combustão podem ser arrastadas e/ou depositadas no combustor, uma vez que processos de combustão geralmente trabalham com temperaturas superiores ao ponto de amolecimento das cinzas e assim, podem causar sinterização ou aglomeração destas em locais que prejudicam a troca térmica [38]. De acordo com a literatura [38-40], o bagaço de cana é composto majoritariamente por dióxido de silício (SiO₂).

Com relação a Densidade Energética do material *in natura* (DE_{*in natura*}), o bagaço de cana apresentou o menor resultado (1,25 kJ cm⁻³), em decorrência dos valores de densidade a granel e de PCS. Segundo Protásio (2014) [22] o bagaço de cana-de-açúcar apresenta densidade a granel de 0,10 (g cm⁻³), com densidade energética de 1,96 (kJ cm⁻³). No trabalho de Silva et al. (2015a) [41] foi apresentado para o bagaço de cana uma umidade de 12% e densidade a granel de 0,06 (g cm⁻³), a qual representaria uma DE_{*in natura*} de 0,91 (kJ cm⁻³), para um PCS de 15,2 MJ kg⁻¹.

No que se refere a análise elementar, os resultados obtidos foram: poda de cajueiro 44,2% de carbono, 5,9% de hidrogênio, 0,9% de nitrogênio, 0,7% de enxofre e 43,7% de oxigênio; poda de mangueira 43,0% de carbono, 5,4% de hidrogênio, 1,0% de nitrogênio, 0,7% de enxofre e 36,4% de oxigênio e bagaço de cana-de-açúcar 38,8% de carbono, 5,2% de hidrogênio, 1,0% de nitrogênio, 0,6% de enxofre e 38,9% de oxigênio. O restante não computado corresponde ao teor de cinzas (A) informado na Tabela 2. De acordo com os dados da análise elementar, independe da amostra de biomassa, os elementos químicos predominantes foram carbono e oxigênio, os quais são os componentes majoritários da celulose, hemicelulose e lignina [38-

40].

Com os resultados da análise elementar a composição química das biomassas é determinada e assim, o melhor tipo de aproveitamento térmico pode ser recomendado, os produtos de combustão podem ser predeterminados e o Poder Calorífico Inferior (PCI) obtido. De acordo com Nogueira e Lora (2003) [8], o bagaço de cana-de-açúcar possui 44,80% de carbono; 5,35% de hidrogênio; 0,38% de nitrogênio; 0,01% de enxofre e 39,55% de oxigênio. No estudo de Protásio (2014) [22], a composição química elementar do bagaço de cana apresentou: 46,8% de carbono; 6,3% de hidrogênio; 0,5% de nitrogênio e 45,3% de oxigênio, não apresentando enxofre.

Conforme relatado na seção Materiais e Métodos, para investigação do potencial energético das biomassas foram avaliados os critérios de maior Poder Calorífico Superior (PCS), Carbono Fixo (F) e Materiais Voláteis (MV) e menor teor de Cinzas (A). Assim, após análise dos resultados obteve-se a indicação das melhores proporções de mistura para produção das blendas (frações em massa %: %): Cana: Mangueira, (50:50), (25:75) e (75:25); Cana: Cajueiro, (50:50), (25:75) e (75:25); Cana: Cajueiro: Mangueira, (50:25:25), (40:30:30) e (60:20:20).

Os perfis térmicos (curvas TG-DTG) das podas do cajueiro e da mangueira e do bagaço de cana-de-açúcar estão apresentados na Figura 1, com ênfase para as temperaturas de pico dos principais eventos térmicos.

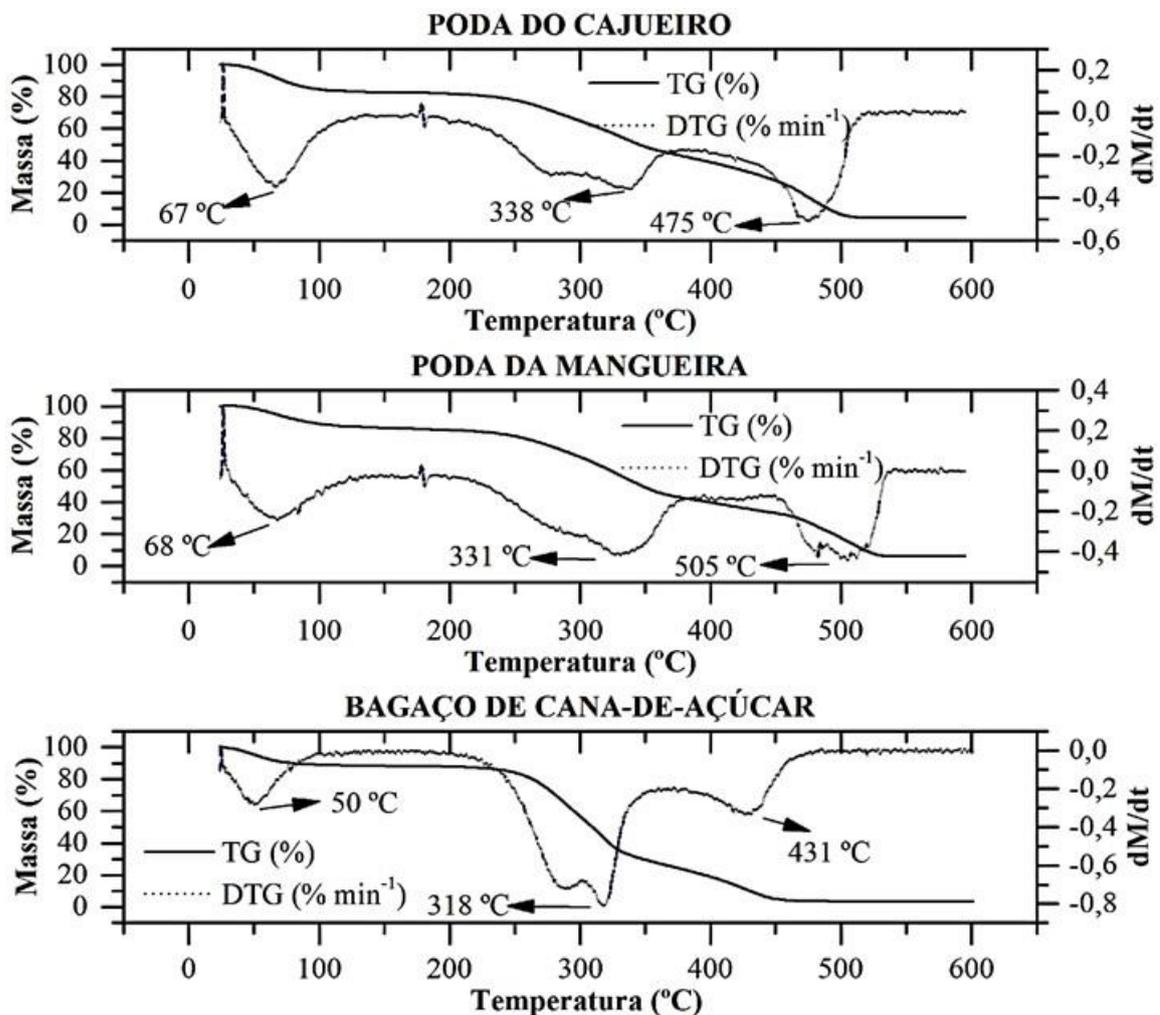


Figura 1: Curvas TG-DTG das podas do cajueiro e da mangueira e do bagaço de cana com indicação das Temperaturas de pico dos principais eventos térmicos (→)

No que se refere ao perfil térmico das amostras, nas curvas TG-DTG da poda do cajueiro (Figura 1) foram observados três eventos significativos, com temperaturas de pico de 67 °C para o 1º evento, 338 °C para o 2º e 475 °C para o 3º evento. O primeiro evento que ocorre na faixa entre 25 e 115 °C é atribuído a perda de água e os dois eventos subsequentes, são atribuídos aos processos de volatilização e degradação dos principais componentes da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina). Com relação a poda da mangueira, o perfil térmico observado (curvas TG-DTG) foi similar ao perfil da poda do cajueiro. O primeiro evento ocorreu entre 25 e 120 °C, com temperatura de pico de 68 °C e está relacionado a perda de água. Os dois eventos posteriores provavelmente estão relacionados à degradação térmica da hemicelulose, celulose e parcialmente da lignina, os quais se degradam quando submetidos a temperaturas acima de 220 °C [21].

De acordo com os perfis das curvas DTG, observou-se que o terceiro evento térmico para a poda da mangueira ocorreu de forma mais alargada, no intervalo entre 470 e 520 °C. Em combustão direta, a madeira, tomada como referência em diversos estudos sobre biomassa, sofre os processos de secagem e liberação dos voláteis a 400 °C e em aproximadamente 500 °C ocorre à ignição desses voláteis [6]. Comportando-se de forma análoga as demais amostras, o perfil térmico do bagaço de cana apresentou três eventos principais, com temperatura de pico para o primeiro em 50 °C, o que sugere que a perda de água ocorre em temperatura mais baixa. Observou-se também um evento térmico entre 250 e 350 °C, o qual pode ser atribuído à decomposição da celulose e hemicelulose (holocelulose) [42].

3.2 Seleção das blendas

O bagaço de cana apresentou um Poder Calorífico Superior de 15,2 (MJ kg⁻¹) e após a formação da blenda bagaço de cana/poda do cajueiro, ocorreu um aumento do PCS da ordem de 11%, o qual é equivalente a 1,7 (MJ kg⁻¹), ver Figura 2. Para a blenda ternária bagaço de cana/poda do cajueiro/poda da mangueira (frações 50%:25%:25%) obteve-se um PCS de 17,2 (MJ kg⁻¹), com aumento de 13,0% com relação ao bagaço de cana puro, o qual equivale a 2,0 (MJ kg⁻¹).

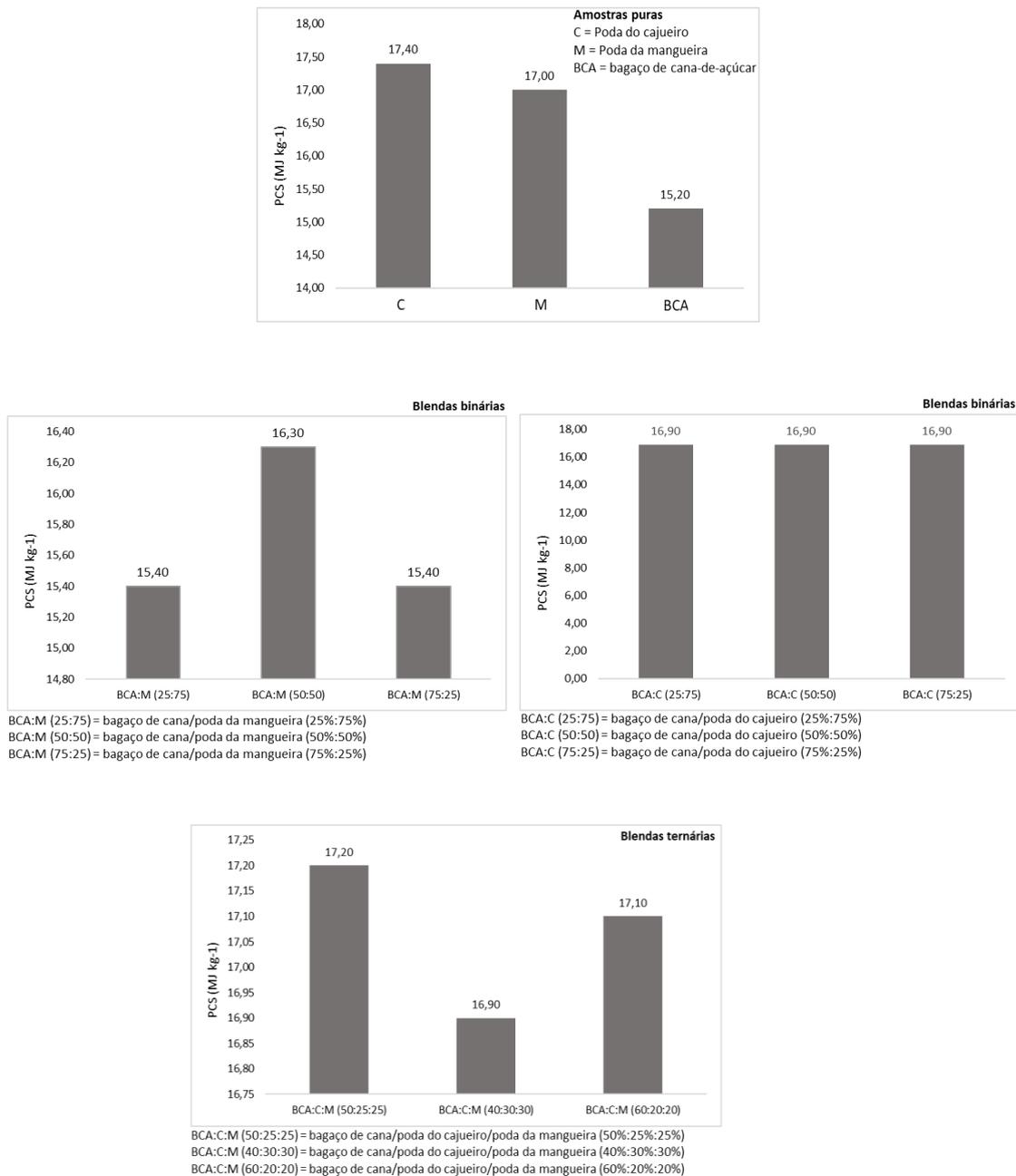


Figura 2: Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras puras e das blendas binárias e ternárias.

De acordo com os resultados, a blenda BCA:M (50:50) apresentou o maior PCS, quando comparada as demais blendas BCA:M. Com relação ao PCS da blenda BCA:C, as três frações (25:75; 50:50 e 75:25) apresentaram resultados idênticos. Desta forma, pode-se recomendar as blendas BCA:M (50:50) e BCA:C (25:75; 50:50 e 75:25) para produção de briquetes, por possuírem o maior potencial energético. Cabe ressaltar que os resultados do PCS podem ser avaliados em base seca, o que representa um valor superior ao obtido em base úmida.

No trabalho de Protásio (2014) [22], foi relatado um PCS de 18,89 (MJ kg⁻¹) para o bagaço de cana-de-açúcar. Em termos de comparação de biomassas, Gonçalves (2010) [26] apresentou um PCI de 19,54 (MJ kg⁻¹) para o briquete de resíduos de madeira e Silva et al. (2015a) [41] um PCI de 15,63 (MJ kg⁻¹) para o bagaço de cana, com 12% de umidade.

Apesar da determinação do PCS ser imprescindível para escolha de um biocombustível, para análise de um conjunto de biomassas faz-se necessária também a avaliação dos resultados da análise imediata (umidade (U), matéria volátil (MV), cinzas (A) e carbono fixo (F)), para que se possa realizar a escolha de forma

mais assertiva. Nas Tabelas 3 a 5 estão apresentados os resultados de cinzas (A), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (F) para as amostras puras, blendas binárias e ternárias.

Tabela 3: Resultados de cinzas (A), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (F) para as amostras puras.

Análise	Poda do cajueiro	Poda da mangueira	Bagaço de cana
Cinzas (A) (%)	4,60	13,50	15,40
Materiais voláteis (MV) (%)	70,10	74,30	69,00
Carbono fixo (F) (%)	24,40	12,20	15,40

Tabela 4: Resultados de cinzas (A), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (F) para as blendas binárias.

Análise	*BCA:M			**BCA:C		
	(25:75)	(50:50)	(75:25)	(25:75)	(50:50)	(75:25)
Cinzas (A) (%)	10,20	6,80	10,90	5,60	5,00	6,00
Materiais voláteis (MV) (%)	73,00	77,10	71,30	79,30	81,90	80,40
Carbono fixo (F) (%)	16,80	16,10	17,70	15,10	13,10	13,60

*BCA:M = blenda bagaço de cana/poda da mangueira

**BCA:C = blenda bagaço de cana/poda do cajueiro

Tabela 5: Resultados de cinzas (A), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (F) para as blendas ternárias.

Análise	* BCA:C:M		
	(50:25:25)	(40:30:30)	(60:20:20)
Cinzas (A) (%)	8,50	12,00	9,50
Materiais voláteis (MV) (%)	75,80	78,40	77,00
Carbono fixo (F) (%)	15,70	9,60	13,50

* BCA:C:M = blenda bagaço de cana/poda do cajueiro/poda da mangueira

Com relação ao bagaço de cana-de-açúcar, os autores Bragato et al. 2012 *apud* Protásio, 2014 [43] encontraram os valores de 13,1% para carbono fixo, 11,3% para cinzas e entre 70 e 87% para materiais voláteis. Silva et al. (2015a) [41] apresentaram em seu trabalho 12% de umidade, 17,22% de carbono fixo, 12,19% de cinzas e 70,59% de materiais voláteis. Dentre os materiais voláteis reportados neste trabalho, o bagaço de cana apresentou o menor valor (69%). Com relação ao teor de carbono fixo, o menor valor está associado a poda da mangueira. Para o teor de cinzas, o bagaço de cana apresentou o maior percentual dentre as biomassas avaliadas (15,4%). Tal resultado é indesejável, pois a alta concentração de cinzas pode afetar o poder calorífico, ocasionar perda de energia e interferir na transferência de calor. O teor de cinzas do carvão mineral presente na matriz energética de vários países varia entre 8,1 e 21,40% [22, 43].

Na abordagem da análise imediata em escala logarítmica, verificou-se que entre as blendas binárias (Figura 3, parte superior), aquelas em que o bagaço de cana-de-açúcar apresentava fração de 50% destacaram-se em mais de uma propriedade, considerando os critérios de escolha anteriormente citados: *maior teor de carbono fixo (F) e matéria volátil (MV) e menor teor de cinzas (A)*.

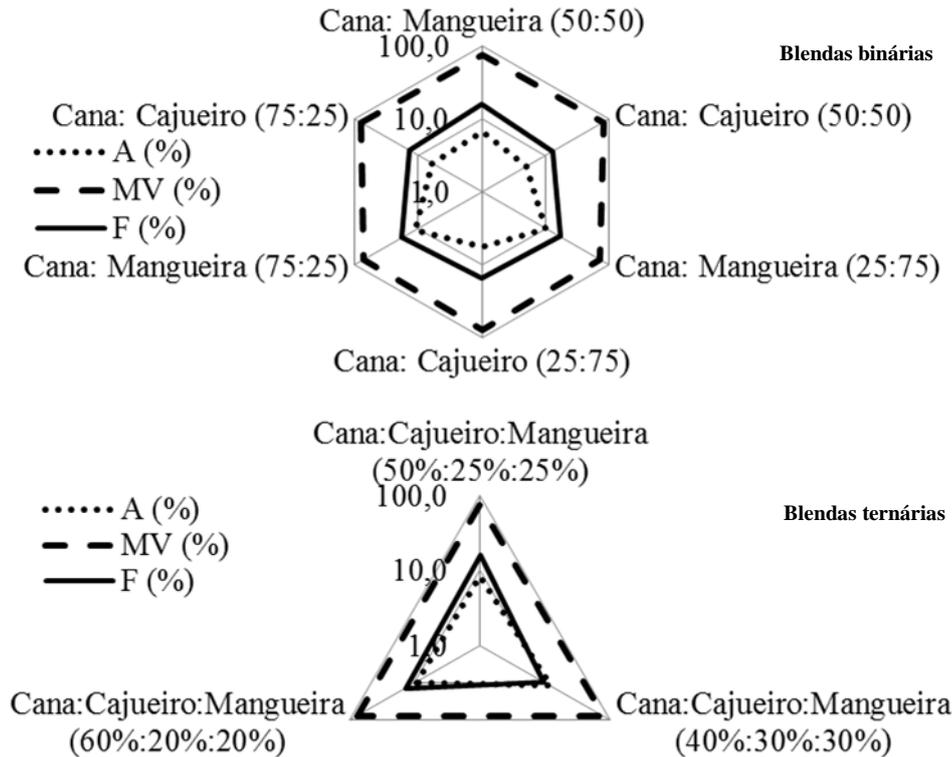


Figura 3: Comparação dos teores de cinzas (A), matéria volátil (MV) e carbono fixo (F) para as blendas binárias e ternárias.

A análise imediata foi determinante para a definição de qual blenda de biomassa deveria ser escolhida, pois os PCS apresentaram valores próximos. Foi escolhido para a produção de briquetes as blendas que apresentaram os maiores valores de Poder Calorífico Superior (PCS), Carbono Fixo (F) e Matéria Volátil (MV) e o menor teor de Cinzas (A). As blendas *bagaço de cana:poda da mangueira* (50%:50%); *bagaço de cana:poda do cajueiro* (50%:50%) e *bagaço de cana:poda do cajueiro:poda da mangueira* (50%:25%:25%) apresentaram os melhores resultados.

3.3 Caracterização dos briquetes

Os briquetes foram produzidos a partir do bagaço de cana (100%) e das blendas bagaço de cana:poda da mangueira (50%:50%), bagaço de cana:poda do cajueiro (50%:50%) e bagaço de cana:poda do cajueiro:poda da mangueira (50%:25%:25%). Observou-se que os briquetes produzidos sofreram dilatação. Constataram-se expansões longitudinais de 4% para o briquete de bagaço de cana após 35 dias, 8% para os briquetes das blendas binárias após 28 dias e 14% para a blenda ternária após 7 dias. A variação diametral não foi significativa. Silva et al. (2015a) [41] relataram em seu trabalho uma expansão longitudinal de 8,10% para o briquete de bagaço de cana, após 9 dias. O bagaço estava com 12% de umidade. De acordo com os autores, para a produção do briquete foram utilizados 20 g de amostra, o diâmetro do molde utilizado foi de 3,5 cm e a força aplicada foi de 500 (kgf) a 3 mm min⁻¹.

Em nosso trabalho, para a produção dos briquetes foram utilizados 80 g de cada biomassa, o diâmetro do molde cilíndrico foi de 5 cm e a força aplicada foi de 500 (kgf) a 3 mm min⁻¹, semelhante a força reportada por Silva et al. (2015a) [41].

Com relação a densidade energética, os briquetes produzidos apresentaram valores superiores as biomassas *in natura*, uma vez que ocorreu o aumento da massa específica na compactação. Para o bagaço de cana-de-açúcar aferiu-se uma densidade aparente (DA) de 0,87 (g cm⁻³) e densidade energética (DE) de 13,22 (kJ cm⁻³), representando uma variação de 955% em relação ao material não compactado. De forma análoga, para o briquete da blenda bagaço de cana:poda da mangueira (50:50) obteve-se 0,83 (g cm⁻³) de DA

e 13,55 (kJ cm⁻³) de DE, com variação de 658%. O briquete da blenda bagaço de cana:poda do cajueiro (50:50) apresentou DA de 0,75 (g cm⁻³) e densidade energética de 12,75 (kJ cm⁻³), com variação de 547%. Para o briquete da mistura ternária bagaço de cana:poda do cajueiro:poda da mangueira (50%:25%:25%) obteve-se 0,71 (g cm⁻³) e 12,18 (kJ cm⁻³), apresentando uma variação de 396%.

No trabalho de Silva et al. (2015a) [41] foi reportado uma densidade aparente (DA) de 0,88 (g cm⁻³) para o bagaço de cana com 12% de umidade, muito próximo à densidade verificada para o briquete de bagaço de cana com 14% de umidade (0,87 g cm⁻³). Determinando-se a densidade energética com base na metodologia empregada em nosso trabalho, o resultado da DA reportado por Silva et al. (2015a) [41] juntamente com o PCS, iria gerar um valor de 13,75 (kJ cm⁻³). De acordo com a análise dos resultados de densidade energética, pode-se inferir que a principal vantagem de se produzir briquete a partir do bagaço de cana é que se passa de 1,25 para 13,22 (kJ cm⁻³), o que representa um aumento de 955% em termos de energia por unidade de volume.

4. CONCLUSÕES

A produção de blendas de biomassa apresentou benefícios como aumento do poder calorífico superior e redução do teor de cinzas. Quanto a produção dos briquetes, o principal benefício é representado pelo aumento da densidade energética na ordem de 955% para o briquete de bagaço de cana, 658% para o briquete da blenda bagaço de cana:poda da mangueira (50:50) e 547% para o briquete da blenda bagaço de cana:poda do cajueiro (50:50). O briquete da blenda ternária bagaço de cana:poda do cajueiro:poda da mangueira (50%:25%:25%) apresentou um aumento na densidade energética da ordem de 396%. A análise dos dados de potencial energético e produção de briquetes de biomassa aponta que, resíduos agroindustriais podem ser combinados ao bagaço de cana-de-açúcar para uso como biocombustíveis.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro (Processos 406697/2013-2 e 459355/2014-7).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] VARELLA, M. D. *O surgimento e a evolução do direito internacional do meio ambiente: da proteção da natureza ao desenvolvimento sustentável*. 4 ed. Brasília: Unitar, Uniceub e Unb, 2009.
- [2] STRAPASSON, A. B., A “Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético”, Dissertação de Mestrado, USP/SP, São Paulo, SP, Brasil, 2004.
- [3] BRASÍLIA. Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel. Ministério de Minas e Energia. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 19 jun. 2015.
- [4] BRASIL. P. S. V. Senado Federal. *Especialistas apontam avanço da energia eólica no Brasil*. 2016. Disponível em: <<http://www12.senado.leg.br/noticias/noticias/materias/2016/08/22/especialistas-apontam-avanco-da-energia-eolica-no-brasil>>. Acesso em: 22 ago. 2016.
- [5] BRASÍLIA. Ministério de Minas e Energia. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Junho – 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 21 ago. 2016.
- [6] RIBEIRO, P. R., CARVALHO, J. R. M., GERIS, R., QUEIROZ, V., FASCIO, M. “Furfural – Da Biomassa ao Laboratório de Química Orgânica”, *Química Nova*, v. 35, pp. 1046-1051, 2012.
- [7] VAZ JÚNIOR, S. *Biomassa para Química Verde*. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2013.
- [8] NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- [9] CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. 3 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.
- [10] SAXENA, R. C., ASHIKARI, D. K., GOVAL, H. B. “Biomass-Based Energy Fuel through Biochemical Routes: A review”, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, v. 13, pp. 167-178, 2009.
- [11] PANWAR, N.L., KOTHARI, R., TYAGI, V.V. “Thermochemical Conversion of Biomass – Eco Friendly Energy Routes”, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, v. 16, pp. 1801-1816, 2012.
- [12] OCDE-FAO (Brasil). Representação da FAO no Brasil. *Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da*

agricultura brasileira 2015-2024. Brasília: OCDE-FAO, 2015.

- [13] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Anuário estatístico da agroenergia* 2014. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/pasta-anuario-estatistico-da-agroenergia/anuario-estatistico-da-agroenergia> >. Acesso em: 12 jun. 2018.
- [14] VIDAL, M. F. “Situação da cajucultura nordestina após a seca”, *Caderno Setorial Etene*, ano 1, n. 4, pp. 17-25, 2016.
- [15] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - MP. *Produção agrícola municipal - lavoura permanente - 2015*. 2015. Disponível em: < https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2015/default_xls.shtm>. Acesso em: 12 jun. 2018.
- [16] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Brasil. *Sistemas de Produção*. 2016. Disponível em: < <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/temas-publicados>>. Acesso em: 12 jun. 2018.
- [17] EASTERLY, J. L., BURNHAM, M. “Overview of Biomass and Waste Fuel Resources for Power Production” *Biomass and Bioenergy*, v. 10, pp.79-92, 1996.
- [18] MCKENDRY, P. “Energy Production from Biomass (PART 1): overview of biomass” *Bioresource Technology*, v. 83, pp. 37-46, 2002.
- [19] STANISLAV, V., VASSILEV, D. B., ANDERSEN, L. K., *et al.*, “An overview of the chemical composition of biomass” *Fuel*, v. 89, pp. 913-933, 2010.
- [20] PEREIRA, C.A., SCHNITZLER, E., CARVALHO FILHO, M.A.S. “Estudo Termoanalítico (TG, DTG e DSC) dos Cafés *In Natura* e Processados”, *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, v. 11, n. 1, pp.61-66, 28 mar. 2005.
- [21] FURTADO, T. S., VALIN, M., BRAND, M. A., *et al.*, “Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal” *Pesquisa Florestal Brasileira - Embrapa*, v. 30, n. 62, pp.101-106, out. 2010.
- [22] PROTÁSIO, T. P. *Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras/MG, Lavras, MG, Brasil, 2014.
- [23] SOUZA, M. R. *Blenda de poli (tereftalato de etileno) com polietileno de baixa densidade*, Dissertação de Mestrado, USP/SP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- [24] RUSCHEL, C. F. C., HUANG, C., SAMIOS, D., *et al.*, “Exploratory Analysis Applied to Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) of Biodiesel/Diesel Blends” *Química Nova*, v. 37, n. 5, pp.810-815, 2014.
- [25] PEREIRA, F. A., CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., *et al.*, “Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio” *Floresta e Ambiente*, pp. 23-29, abr. 2008.
- [26] GONÇALVES, J. E. *Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis*, Tese de Doutorado, UNESP/SP, Botucatu, SP, Brasil, 2010.
- [27] OLIVEIRA JÚNIOR, E. M. *Produção de briquetes com resíduos de vegetais de jardinagem e podas em condomínios residenciais*, Dissertação de Mestrado, UFSCar/SP, Sorocaba, SP, Brasil, 2013.
- [28] HANSTED, A. L. S., NAKASHIMA, G. T., MARTINS, M. P., *et al.*, “Physico-Chemical Characterization of Leucaena leucocephala Biomass for Solid-Fuel Production”, *Revista Virtual de Química*, v. 8, n. 5, pp.1449-1460, 2016.
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. ASTM International. United States, 2004.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3852: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro, 2009.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 2420: Couro – Ensaio físicos e mecânicos – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 2015.

- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003a.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 52 °C. Rio de Janeiro, 2003b.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E1131-08: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. ASTM International. United States, 2008.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3176-15: Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. ASTM International. United States, 2015.
- [37] ROSA, A. P. Avaliação da viabilidade técnica e ambiental do uso do conteúdo ruminal bovino como biocombustível, Dissertação de Mestrado, UFMG/MG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.
- [38] LENÇO, P. C. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, Brasil, 2010.
- [39] MANYÀ, J. J., ARAUZO, J. “An alternative kinetic approach to describe the isothermal pyrolysis of micro-particles of sugar cane bagasse”, *Chemical Engineering Journal*, v. 139, pp.549-561, 2008.
- [40] RESENDE, F. L. P. *Comparação entre as técnicas de análise termogravimétrica e leito fluidizado para pirólise de biomassa*, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Campinas, SP, Brasil, 2003.
- [41] SILVA, D. A., YAMAJI, M. F., BARROS, J. L., *et al.*, “Caracterização de Biomassas para a Briquetagem” *Floresta*, v. 45, n. 4, pp.713-722, 9 set. 2015a.
- [42] GARCÍA, R., PIZARRO, C., LAVÍN, A. G., *et al.*, “Biomass proximate analysis using thermogravimetry” *Bioresource Technology*, v. 139, pp. 1–4, 2013.
- [43] BRAGATO, M., JOSHI, K., CARLSON, J.B., *et al.*, “Combustion of coal, bagasse and blends thereof. Part I: Emissions from batch combustion of fixed beds of fuels”, *Fuel*, v. 96, pp. 43-50, 2012.

ORCID

Marcelo Rodrigues Ponte	https://orcid.org/0000-0001-9531-4333
Antônica Mabrysa Torres Gadelha	https://orcid.org/0000-0001-9003-8827
Ada Amélia Sanders Lopes	https://orcid.org/0000-0003-0237-8595
Yguatyara de Luna Machado	https://orcid.org/0000-0003-2447-4449
Maria Alexandra de Sousa Rios	https://orcid.org/0000-0002-3145-0456
Jackson Queiroz Malveira	https://orcid.org/0000-0002-6912-7937
Selma Elaine Mazzetto	https://orcid.org/0000-0002-6879-3209
Diego Lomonaco	https://orcid.org/0000-0001-5763-4336