

## CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR ARMAZENADO SEM COBERTURA POR UM PERÍODO PROLONGADO

Mateus Azevedo Chaves Correia \*

Omar Seye \*\*

Aletéia Marcelle Primão da Silva \*\*\*

Robson Leal da Silva \*\*\*\*

**RESUMO:** A biomassa é a terceira maior fonte de energia para conversão em eletricidade no país, do qual o bagaço da cana-de-açúcar é o insumo energético mais relevante. O bagaço é biomassa residual do processo de moagem industrial, cujo armazenamento faz-se necessário devido à sazonalidade da produção. Os experimentos foram realizados para amostras da estocagem do material em posições distintas (degradação diferenciada), obtido em unidade agroindustrial com 70 mil toneladas adquiridas para utilização em caldeira a vapor. O propósito é avaliar as características físico-químicas (análise imediata, incluindo umidade) e energéticas (poder calorífico) do bagaço da cana-de-açúcar, quando submetido a condições de estocagem a céu aberto durante três anos; com isto, estudar a influência do clima e das condições de armazenamento em alterações do potencial energético desta biomassa residual. Destacam-se os seguintes resultados obtidos: a) Massa específica quatro vezes superior e  $T_{UM,BU}$  alcançando 85% quando o bagaço é armazenado a céu aberto; b) Reduzido  $T_{CZ}$  (< 1%) possibilitando reduzidos danos e manutenção quando utilizado em caldeiras a vapor; c) Sem degradação significativa para uso como combustível sólido, quanto à  $T_{MV,BS}$  e  $T_{CF,BS}$ , propiciando respectivamente ignição e estabilidade da combustão, e contribuição significativa no PCS; d) Valores médios para poder calorífico serão consumidos em 15% ou mais no processo de secagem do bagaço; e) A energia térmica disponível (~27 mil TEP) tem significativo potencial para geração de energia e aumento no valor agregado da produção agroindustrial.

\* Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (UFSM), Engenheiro de Energia pela Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, Brasil.

\*\* Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos (UNICAMP), Professor Associado na Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, Brasil.

\*\*\* Mestre em Produção e Gestão Agroindustrial (Anhanguera-Uniderp), Administradora de Empresas e Negócios pela Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, Brasil.

\*\*\*\* Doutor em Eng. Aeronáutica e Mecânica (ITA), Professor Associado na Universidade Federal da Grande Dourados -UFGD e docente permanente do PPG/Mestrado em Eng. Mecânica da Universidade Estadual de Maringá - UEM, Brasil. E-mail: rlealsilva@hotmail.com

**PALAVRAS-CHAVE:** Biomassa residual; Cogeração de energia; Combustão industrial; Setor sucroenergético.

## **CHARACTERISTICS AND ENERGETIC POTENTIAL OF SUGARCANE BAGASSE STORED WITHOUT ANY COVER FOR A LONG PERIOD**

**ABSTRACT:** Biomass ranks third as the greatest energy source for the conversion of electricity in Brazil, with sugarcane as the most relevant energy input. Bagasse is the residual biomass in the crushing process and its storage is required due to the production's seasonality. Experiments have been undertaken for samples of stocked material in different positions (differentiated degradation) obtained in an agro-industrial unit with seventy thousand tons acquired for use in a steam boiler. Physical and chemical (immediate analysis, including humidity) and energetic (heat power) characteristics of sugarcane bagasse were evaluated when undergoing stocking conditions in the open air during three years. Climate influence and storage conditions were analyzed in alterations of the energy potential of residual biomass. The following results are underscored: a) specific mass was four times higher and  $T_{UM,BU}$  reached 85% when bagasse was stored in the open air; b) decrease of  $T_{CZ}$  ( $< 1\%$ ), making possible reduced damage and maintenance when used in steam boilers; c) without significant degradation as solid fuel with regard to  $T_{MV,BS}$  and  $T_{CF,BS}$ , provides respectively ignition and stability of fuel, and significant contribution in PCS; d) mean rates for calorific power will be consumed at 15% or more, within the process of bagasse drying; e) available thermal energy ( $\sim 27$  mil TEP) has a significant potential for the co-generation of energy and increase in aggregated value of agro-industrial production.

**KEY WORDS:** Residual biomass; Energy Co-generation; Industrial combustion; Sugar-energy sector.

## **INTRODUÇÃO**

O bagaço da cana-de-açúcar é um relevante insumo energético no Brasil, com média anual de  $\sim 154.10^6$  ton.ano<sup>-1</sup> (2007-2016), representando 78% da capacidade instalada de geração elétrica proveniente de biomassas diversas (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2018). A biomassa é a terceira maior fonte de energia para conversão em eletricidade no país, além de ter apresentado excepcional crescimento na última década (NOGUEIRA; SANTOS; RODRIGUES, 2017). O setor sucroe-

nergético apresenta significativa participação na economia regional nos Estados do Paraná (~30 usinas) e Mato Grosso do Sul (~22 usinas), alternando-se como 2º e 3º maiores produtores nacionais nos últimos anos (SILVA; GARCIA; SILVA, 2010; SILVA *et al.*, 2017). Além destas usinas, existe grande potencial para cogeração de energia (térmica e elétrica) nas demais agroindústrias destas regiões, possibilitando melhores resultados econômicos com mais este produto. O uso principal deste coproduto (bagaço) é para conversão energética nas próprias unidades produtoras e exportação (venda) do excedente ao Sistema Elétrico Nacional. No Estado do Paraná, ~28% desta biomassa residual não possui destino identificado, sendo comercializados *in natura* ~16% e uso em cogeração própria ~56% (SILVA; GARCIA; SILVA, 2010).

Trata-se de biomassa residual do processo industrial de moagem, do qual são obtidos ~250 kg.ton<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar (ALVES, 2006). No Brasil, o Estado de Mato Grosso do Sul tem a quarta maior área cultivada para produção da cana-de-açúcar (~712.10<sup>3</sup> ha). Parcela significativa é na região territorial “Grande Dourados”, onde está situado o município com de Rio Brillhante (MS), com 82.488 ha e 5.728.622 toneladas, a quarta maior produção nacional (IBGE, 2018; NOVACANA, 2015). O papel da bioenergia originada da cana-de-açúcar é objeto de estudo e discussão em relação às questões ambientais, sociais e econômicas, bem como de sustentabilidade e impacto nas atividades humanas, além das perspectivas e desafios futuros envolvidos (JULCA-BRICE; NEVES, 2011; LAINE, 2014).

O uso final deste subproduto no setor agroindustrial é como combustível sólido (caldeiras a vapor e cogeração de energia: energia térmica, mecânica e elétrica), fertilizante (adubo orgânico), alimentação animal ou armazenamento (longo ou curto períodos, locais fechados ou abertos) até utilização efetiva. Além das aplicações típicas na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, outras possibilidades de aplicação do bagaço incluem: fabricação de carvão vegetal e carvão ativado (filtragem e tratamento de ar e água, descontaminação ambiental, etc), peletes e briquetes (combustível sólido para lareiras residenciais e fornos em pizzarias, padarias e hotéis), aditivo estabilizante na produção de mistura asfáltica (SMA - *Stone Matrix Asphalt*), papel (sulfite e embalagens), painéis de material aglomerado (ex.: cimento-liga e placas) e etanol de segunda e terceira geração (bagaço, palha e palhiço), areia de cinza do bagaço de cana (substituindo areia para construção civil), dentre outros (MANSOR

*et al.*, 2018; CABRAL; NAKANISHI; FIORELLI, 2018; ZAPAROLLI, 2018; ALMEIDA; SOLA; BEHAINNE, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2016).

Biomassa energética é a denominação para qualquer tipo de matéria orgânica, formada através do processo de fotossíntese. Tratando-se da obtenção de energia térmica e/ou elétrica originada de insumos energéticos via processos de conversão (ex.: combustão, gaseificação, etc), a substituição de fontes não renováveis (i.e., combustíveis fósseis) por biomassa residual (i.e., combustível renovável) é uma opção consistente com a matriz energética do Brasil e alguns outros países. A avaliação das características energéticas de biomassas visando conversão em energia envolve a determinação experimental de poder calorífico superior (PCS,  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ), massa específica ( $\text{kg.m}^{-3}$ ), análise imediata (umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo), análise elementar (C, H, N, S e O), análise somativa (% massa, celulose, hemi-celulose, lignina e outras), composição de cinzas (% mássica, K, Na, Ca, MG, P, Si, Fe), e outras específicas quando necessário.

Embora de significativa participação na matriz energética nacional, não existe técnica ou planejamento na estocagem do bagaço da cana-de-açúcar, cuja organização física das pilhas de bagaço é dificultada pelas suas dimensões. Na maioria das usinas brasileiras, um trator espalha o bagaço no alto da pilha, que pode chegar a ter cerca de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura, correspondendo a ~100.000 toneladas de bagaço estocadas (SANTOS *et al.*, 2011). O armazenamento faz-se necessário devido à sazonalidade da produção, e interesse na utilização do bagaço para cogeração de energia. O aumento do teor de umidade ao longo do tempo é esperado, devido às características higroscópicas (TEIXEIRA *et al.*, 2015). O armazenamento e destinação adequados do bagaço da cana-de-açúcar é parte da gestão de resíduos sólidos da agroindústria, a qual tem implicações ambientais e de sustentabilidade (ZANIBONI; SCHMIDT, 2014).

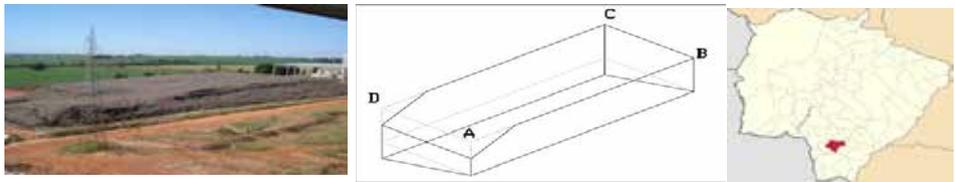
Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar as características físico-químicas (análise imediata, incluindo umidade) e energéticas (poder calorífico) do bagaço da cana-de-açúcar, quando submetido a condições de estocagem a céu aberto por longo período. Estudar a influência do clima e das condições de armazenamento em alterações do potencial energético desta biomassa residual complementa a proposta de pesquisa. O material foi adquirido para uso em caldeiras indus-

triais para fornecimento de energia térmica em processo de produção de biodiesel; ficou armazenado a céu aberto por longo período, devido a dificuldades técnicas e financeiras para iniciar operação da unidade agroindustrial em questão.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ORIGEM DAS AMOSTRAS E CARACTERÍSTICAS LOCAIS

O material utilizado é oriundo de unidade agroindustrial (AGRENCO, 2011), adquirido em quantidade única de 70 mil toneladas e armazenadas em céu aberto durante 3 anos (2007-2010), Figura 1 (esquerda). O local do empreendimento está situado em Caarapó (MS) (latitude 22°38'02" Sul, longitude 54°49'19" Oeste e 471 m de altitude), região Sudoeste do Estado de Mato Grosso do Sul, com classificação climática de Köppen-Geiger do tipo Aw e solo do tipo latosolo roxo (IBGE, 2018). Temperatura e pluviosidade média anual são, respectivamente, 22,5 °C e 1547 mm (CLIMATEMPO, 2018).



**Figura 1.** Bagaço da cana-de-açúcar armazenado, geometria do volume total e localização geográfica - Caarapó (MS). Fonte: AGRENCO (2011); IBGE (2018).

Amostras consistindo em 10 (dez) porções com ~1 kg de bagaço da cana-de-açúcar, retiradas de posições diversas no perímetro externo da Figura 1. Em razão de topografia irregular do terreno com declive na base B-C e A-D, amostras de lados distintos visaram identificar eventual degradação diferenciada do material armazenado, com eventual acúmulo de água devido à pluviosidade no local; adicionalmente, tem-se maior incidência de radiação solar nos lados C-D e D-A. Assim, tem-se amostras identificadas como “1” a “3” (retiradas do lado A-B); “4” e “5” (lado B-C); “6” a “9” (lado C-D; maior altura) e amostra “10” (lado D-A; menor altura).

As amostras foram coletadas com profundidade mínima de 20-30 cm da superfície, visando isenção de elementos contaminantes eventuais da matéria-prima.

## 2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados para 10 amostras diferentes, todos em duplicada (2 repetições, para obtenção de dois resultados validados), considerando cada um dos parâmetros determinados. A preparação das amostras seguiu a NBR-7402 (ABNT, 1982) com adaptações, incluindo moagem e acondicionamento, visando preservar condições originais do local de armazenamento a céu aberto.

Equipamentos utilizados incluem cadinhos de porcelana (e tampas), desidratador de vidro (resfriamento das amostras), balança analítica (resolução  $10^{-4}$  g), estufa de recirculação (até 110 °C), forno mufla (até 1200 °C), moinho de facas, e material para manipulação e movimentação das amostras.

### 2.2.1 Massa Específica e Teor de Umidade

Quando à massa específica ( $\rho$ ,  $\text{kg.m}^{-3}$ ), tomou-se como referência a NBR-6922 (ABNT, 1981). Foi utilizado um cadinho de porcelana como recipiente (40 ml de volume) e balança analítica.

Para determinação do  $T_{UM}$ , a amostra é inserida em cadinho (aberto) e deve ser colocada em estufa previamente aquecida a  $105 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . Cada amostra de biomassa tem um tempo total de secagem diferente, em função do teor de umidade. Assim deve ser deixada tempo suficiente na estufa de recirculação, até que nenhuma diferença seja registrada entre duas pesagens sucessivas em balança. Foi realizada pesagem com 3 (três) intervalos de 30 minutos e, após 24 horas, para confirmar a estabilização da massa final de cada amostra.

## 2.2.2 Análise Imediata

Para realização da análise imediata tomou-se como referência os procedimentos estabelecidos em norma técnica NBR-8112 (ABNT, 1986), para os teores de: umidade em base úmida e base seca ( $T_{UM,BS}$ , %;  $T_{UM,BU}$ , %;  $\Delta T_{UM} \leq 5\%$  e tamanho de partícula  $< 19\text{mm}$ ), matéria volátil ( $T_{MV,BU}$ , %;  $\Delta T_{MV} \leq 2\%$ ;  $0,150\text{ mm} < \text{tamanho de partícula} < 0,210\text{ mm}$ ), e cinzas ( $T_{CZ,BU}$ , %;  $\Delta T_{CZ} \leq 10\%$ ; tamanho de partícula  $< 0,210\text{ mm}$ ). O teor de carbono fixo ( $T_{CF,BU}$ , %) é determinado por diferença centesimal ( $T_{CF,BU} = 100 - T_{UM,BU} - T_{VM,BU} - T_{CZ,BU}$ ; ou  $T_{CF,BS} = 100 - T_{VM,BS} - T_{CZ,BS}$ ).

Temperatura de ensaio para  $T_{MV,BU}$  e  $T_{CZ,BU}$  é respectivamente: cadinho fechado (com tampa) a  $900 \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  por 3 minutos sobre a porta do forno mufla e mais 7 minutos no interior (com a porta fechada) e cadinho aberto (sem tampa) a  $700 \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  durante 60 minutos.

## 2.2.3 Determinação do PCS e PCI

O poder calorífico superior (PCS,  $\text{MJ.kg}^{-1}$ ) pode ser determinado experimentalmente utilizando bomba calorimétrica, conforme NBR-8633 (ABNT, 1984) ou estimado por meio de correlações empíricas, baseadas em resultados experimentais da análise imediata (PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005). O poder calorífico inferior (PCI,  $\text{MJ.kg}^{-1}$ ) é obtido de correlações empíricas (GARCIA, 2013). Assim, PCS e PCI são determinados via Equações (1) e (2), assumindo  $T_{\text{Hidrogênio}} = 6\%$  para o bagaço da cana-de-açúcar (PAULA *et al.*, 2011; GARCIA, 2013).

$$\text{PCS (MJ.kg}^{-1}\text{)} = 0,3536.(T_{CF,BS}) + 0,1559.(T_{MV,BS}) - 0,0078.(T_{CZ,BS}) \quad (1)$$

$$\text{PCI (MJ.kg}^{-1}\text{)} = \text{PCS} - 2240. [ (9.T_{\text{Hidrogênio}} + T_{UM,BU}) ] \quad (2)$$

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do  $T_{UM,BU}$  (%) e  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é apresentada na Tabela 1, para os quatro lados do perímetro externo de armazenamento (Figura 1). O lado D-A apresenta, em média, menores valores para massa específica e umidade, possivelmente

devido à reduzida altura do armazenamento (Figura 1); enquanto que os lados A-B e B-C apresentam, em média, os maiores valores, possivelmente devido à menor incidência de radiação solar que é predominante nos lados C-D e D-A. Quando recém moído, tem-se  $\rho_{\text{Bagaço}} \sim 126 \text{ kg.m}^{-3}$  (GARCIA, 2013), e quase quatro vezes maior se armazenado a céu aberto ( $\rho_{\text{Médio}} \sim 486 \text{ kg.m}^{-3}$ ), neste trabalho. Adicionalmente, o bagaço da cana-de-açúcar adquire características ácidas,  $\text{pH} \sim 4,27$  e  $T_{\text{UM,BU}} \sim 78\%$ , em reduzida amostragem (SILVA; CORREIA; BEZERRA, 2010).

Quanto ao tempo requerido para secagem das amostras, foi identificado que após 90 minutos inexistiam diferenças de valores registrados na pesagem; a secagem completa foi reafirmada com nova pesagem após 1440 minutos (24 horas). Resultados consistentes com norma técnica recente para determinação das características químicas do bagaço da cana-de-açúcar (ABNT, 2018), a qual estabelece 2 horas para o tempo de secagem em estufa. A secagem evapora a umidade hidrosscópica (devido ao solo e chuvas), a qual dificulta a queima do combustível e aumenta o volume dos produtos de combustão (VLASSOV, 2001), portanto são indesejáveis no uso do bagaço da cana-de-açúcar como combustível sólido.

**Tabela 1.** Análise imediata das amostras de bagaço da cana-de-açúcar

Lado	Amostra	$T_{\text{UM,BU}}$ (%) valor médio	$\rho$ ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) valor médio
A-B	1, 2 e 3	80,5	506,3
B-C	4 e 5	79,1	517,6
C-D	6, 7, 8 e 9	76,1	449,4
D-A	10	72,9	470,0

Em geral, o bom desempenho de biomassas como combustível sólido é associado a valores elevados da massa específica ( $\uparrow$  PCS), desde que com valores reduzidos para umidade. Processamento industrial indica valores entre 44-51% após a moagem do bagaço saindo entre 25 e 70 °C (OLIVEIRA, 2014); maior teor de umidade é associado a menor temperatura, que resulta em condensação e acúmulo de umidade na esteira transportadora. Armazenamento em pátio de estocagem sem cobertura e consequente aumento do teor de umidade do bagaço da cana-de-açúcar são relatados na literatura (SANTOS *et al.*, 2011). Para conservação ao ar livre é

recomendada inclinação mínima de 30°, com formato piramidal ou cônico, complementado com superposição (sentido do comprimento) de folhas de cana-de-açúcar, similar a um telhado de sapé (PAOLIELLO, 2006). Assim, resultados obtidos na Tabela 1 indicam que armazenamento predominantemente horizontal e retangular (Figura 1) é inadequado, visto predominar aumento de umidade em todo o perímetro avaliado, com maior intensidade em lados específicos acentuados em função da topografia do terreno.

Na Tabela 2, estão expressos resultados experimentais para análise imediata completa, que fornecem aspectos qualitativos. O  $T_{CZ}$  varia entre 0,14% e 0,81%, ou seja, indicando de maneira geral valores < 1%. Valores bem superiores são registrados na literatura, alcançando  $T_{CZ} \sim 11\%$  para o bagaço da cana-de-açúcar recém moído, apenas inferiores àqueles para casca de arroz com ( $T_{CZ} \sim 18\%$ ) (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Tal diferença possivelmente deve-se ao fato de armazenamento por longo período permitir a lavagem de impurezas típicas, terra e material inorgânico, por meio da pluviosidade ocorrida a céu aberto.

**Tabela 2.** Análise imediata das amostras de bagaço da cana-de-açúcar

Amostra	$T_{UM,BU}$ (%)	$T_{MV,BS}$ (%)	$T_{CZ,BS}$ (%)	$T_{CF,BS}$ (%)	Amostra	$T_{UM,BU}$ (%)	$T_{MV,BS}$ (%)	$T_{CZ,BS}$ (%)	$T_{CF,BS}$ (%)
1	82,83	69,70	0,81	29,50	6	78,00	85,00	0,30	14,70
2	85,00	89,00	0,58	10,42	7	75,25	87,00	0,23	12,77
3	84,85	61,39	0,42	38,19	8	76,77	87,00	0,15	12,85
4	80,81	83,83	0,19	15,97	9	77,00	85,00	0,18	14,82
5	80,00	78,22	0,20	21,59	10	72,28	74,26	0,14	25,60

Maiores valores para  $T_{MV,BS}$  ( $\sim 89\%$ ) e  $T_{CF,BS}$  ( $\sim 38\%$ ) referem-se às amostras 2 e 3 (lado A-B, Figura 1), valores em base seca que são determinados após a secagem da biomassa residual. Os materiais voláteis referem-se a hidrocarbonetos gasosos ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , ...), condensáveis ou não à temperatura ambiente, e a maioria destes gases combustíveis possuem maior PCS e menor temperatura de ignição (300-600 °C), em relação à parcela de carbono fixo (ou coque) existente em combustível sólido (ex.: carvão mineral e vegetal); assim, contribui para a ignição, e

estabilizar o processo de combustão, até que inicie-se a combustão da parte sólida (VLASSOV, 2001). Adicionalmente, chamas longas indicam grande saída de voláteis, garantindo também uma combustão mais completa.

A contribuição do  $T_{CF}$  para o PCS é significativa, visto que o carbono é o principal elemento combustível ( $PCS_C = 34,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$  e parte deste é componente no material volátil), com o hidrogênio ( $PCS_H = 120,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , porém  $\sim 2\text{-}4\%$  da massa total em combustíveis sólidos) e enxofre ( $PCS_S = 9,3 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , massa  $< 5\%$  em combustíveis sólidos), conforme Vlassov (2001); estes componentes atômicos são avaliados quantitativamente na análise elementar, a qual permite um cálculo preciso da combustão. Assim,  $T_{MV}$  e  $T_{CF}$  são os componentes principais da análise imediata que devem contribuir para o PCS do bagaço da cana-de-açúcar, e quando um deles é máximo, tem-se o mínimo do outro, e vice-versa.

A Tabela 3 indica o poder calorífico estimado a partir dos resultados experimentais para análise imediata (base seca), com  $PCS_{\text{Médio}} \sim 19,42 \text{ MJ.kg}^{-1}$  e  $PCI_{\text{Médio}} \sim 16,17 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Diferenças entre PCS e PCI para amostras recém processadas na indústria são inferiores a 5% (OLIVEIRA, 2014), enquanto que a diferença aqui obtida é 17%, ressaltando tratar-se de material armazenado a céu aberto e valores estimados. Registros na literatura indicam PCS  $\sim 16\text{-}17 \text{ MJ.kg}^{-1}$  (OLIVEIRA, 2014; BRAND, 2010), ou seja, valores aqui obtidos são superestimados em cerca de 18%. Assim, as 70 mil toneladas de bagaço da cana-de-açúcar armazenadas no local correspondem a potencial de energia disponível de  $\sim 1,1319.10^6 \text{ GJ}$  ( $\sim 26,950 \text{ TEP}$  - Toneladas Equivalentes de Petróleo;  $1 \text{ TEP} = 42 \text{ GJ}$ ).

**Tabela 3.** Poder calorífico para amostras do bagaço da cana-de-açúcar armazenado

Amostra	PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCI (MJ.kg <sup>-1</sup> )	Amostra	PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCI (MJ.kg <sup>-1</sup> )
1	21,29	17,95	6	18,45	15,23
2	17,55	14,16	7	18,08	14,93
3	23,07	19,68	8	18,11	14,92
4	18,72	15,43	9	18,49	15,29
5	19,83	16,56	10	20,63	17,55

A determinação da umidade do bagaço da cana-de-açúcar no próprio local de armazenamento ou ainda em tempo real de armazenamento possui poucos estudos. Técnicas recentes para estimativas do teor de umidade volumétrica (SANTOS *et al.*, 2016) apresentam resultados consistentes e validados até 80% de umidade. Com  $T_{UM,BS} \sim 80\%$  e que a vaporização da água contida no bagaço da cana-de-açúcar (desidratação) requer em média  $\sim 2,738 \text{ MJ.kg}^{-1}$  (TEIXEIRA *et al.*, 2015), a quantidade de energia necessária a secagem de 1 kg é cerca de 14% ( $2,738 / 19,42$ ) do PCS. Por este critério,  $PCI = 16,70 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , ou seja, diferença menor do que 4% em relação ao  $PCI_{\text{Médio}}$  aqui obtido (Tabela 3).

A energia térmica requerida para secagem pode ser obtida por meio da combustão da própria matéria-prima, no interior da própria caldeira a vapor ou em processo externo; no último caso deve-se considerar adicionalmente a eficiência do processo externo e os custos adicionais deste sistema (POLI *et al.*, 2013).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se destacar os seguintes elementos principais do estudo:

a) A massa específica alcança quatro vezes o valor médio ( $\rho \sim 486 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e o  $T_{UM,BU}$  (%) alcança 85% quando armazenado a céu aberto, em comparação ao bagaço recém-moído com  $T_{UM,BU} \sim 50\%$ . Posições laterais em que a altura do armazenamento é reduzida, e nos quais há maior incidência de radiação solar, proporcionam menores valores para teor de umidade e massa específica, que são os aspectos desejáveis para utilização em caldeiras a vapor.

b) O  $T_{CZ}$  é reduzido ( $< 1\%$ ) em comparação ao bagaço da cana-de-açúcar recém-moído ( $T_{CZ} \sim 11\%$ ), possivelmente devido à retirada de impurezas típicas por meio da pluviosidade ocorrida a céu aberto. Valores elevados implicam em danos significativos na operação e manutenção de caldeiras a vapor.

c) Não houve degradação significativa para uso como combustível sólido, visto que o  $T_{MV,BS}$  e  $T_{CF,BS}$  alcançam valores elevados, respectivamente  $\sim 89\%$  e  $\sim 38\%$ . O primeiro auxilia na ignição e na estabilidade do processo de combustão, bem como condições para combustão mais completa; o segundo contribui mais significativamente no PCS, visto que o carbono é o principal elemento combustível.

d) Os valores médios para poder calorífico (PCI  $\sim 16$  MJ.kg<sup>-1</sup> e PCS  $\sim 19$  MJ.kg<sup>-1</sup>) são superestimados, e também, devido ao teor de umidade até 35% maior em comparação ao recém-moído, deve implicar em consumo de 15% ou mais do PCS para energia no processo de secagem durante a combustão na agroindústria.

e) A energia térmica disponível é  $\sim 27$  mil TEP, ou seja, significativo potencial para cogeração de energia em agroindústrias, e possibilidade de melhores resultados econômicos ao agregarem valor na produção em caso de venda desta energia.

## 5 AGRADECIMENTOS

À FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, projeto de pesquisa “BIO-COMB - Aplicação do Biocombustível no Ensino de Engenharia e Ensino Médio” (Edital MCT/FINEP/CT-PETRO PROMOPETRO 02/2009), por bolsa ITI - Iniciação Tecnológica Industrial e material adquirido. Aos alunos de graduação participantes nas etapas iniciais do trabalho, à empresa AGRENCO Bioenergia pela matéria-prima fornecida para análise.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 16550**: Bagaço de cana-de-açúcar - caracterização química. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. **NBR 6922**: carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981. 2 p.

ABNT. **NBR 7402**: Carvão vegetal - determinação granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3 p.

ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal - análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.

ABNT. **NBR 8633**: Carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 12 p.

AGRENCO. **Agrenco Bioenergia Ind. Com. Óleos Biodiesel Ltda.** São Paulo, 2011. Disponível em: <https://agrencogroup.com/>. Acesso em: set. 2012.

ALMEIDA, L. F. P.; SOLA, A. V. H.; BEHAINNE, J. J. R. Sugarcane bagasse pellets: characterization and comparative analysis. **Acta Scientiarum Technology**, v. 39, n. 4, p. 461-468, 2017. DOI: 10.4025/actascitechnol.v39i4.30198.

CABRAL, M. R.; NAKANISHI, E. Y.; FIORELLI, J. Cement-bonded panels produced with sugarcane bagasse cured by accelerated carbonation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 6, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002301.

CLIMATEMPO. **Climatologia**: Caarapó - MS. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/1115/caarapo-ms>. Acesso em: set. 2018.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. 733 p.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Balço Energético Nacional, ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 296 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/default.aspx>. Acesso em: set. 2018.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 358 p. ISBN-10: 8571933030

GONÇALVES, S. P. C.; STRAUSS, M.; DELITE, F. S.; CLEMENTE, Z. Activated carbon from pyrolysed sugarcane bagasse: Silver nanoparticle modification and ecotoxicity assessment. **Science of the Total Environment**, v. 565, n. 15, p. 833-840, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.041>.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola: Mato Grosso do Sul. *In*: IBGE. **SIDRA**: banco de tabelas estatísticas. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/mato-grosso-do-sul>. Acesso em: ago. 2018.

JULCA-BRICE, B. M.; NEVES, M. F. Caracterización de sistemas agroindustriales: un estudio comparativo de los sectores sucroenergéticos de Brasil y Colombia. **Interciencia**, v. 36, p. 356-364, 2011.

LAINE, J. La bioenergía como alternativa para el desarrollo sustentable. **Interciencia**, v. 39, p. 205-206, 2014.

MANSOR, S.; ZAINUDDIN, N. I.; AZIZ, N. A.; RAZALI, M.; JOOHARI, M. I. Sugarcane bagasse fiber - an eco-friendly pavement os SMA. **AIP Conference Proceedings**, v. 2020, n. 1, p. 020032(1-6), oct. 2018. DOI: 10.1063/1.5062658.

NOGUEIRA, T. C. de S.; SANTOS, D. F. L.; RODRIGUES, S. V. Valoração de usina terméletrica de biomassa: um estudo de caso. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 343-369, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n2p343-369>.

NOVACANA. **As 100 cidades que mais produziram cana-de-açúcar no Brasil em 2014**. 2015. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/mercado/100-cidades-produziram-cana-acucar-brasil-2014-121115/>. Acesso em: out. 2017.

OLIVEIRA, S. F. A. **Avaliação energética da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes indústrias sucroenergéticas**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Produção) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

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.

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

POLI, D. C. R.; ZANCHETA, M. N.; BOARI, Z. M.; MELDONIAN, N. L.; MOURA, C. L.; JIURGIU, P. A. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 8, p. 9-31, 2013.

SILVA, R. L. da; CORREIA, M. A. C.; BEZERRA, I. D. 054-Potencial Agroecológico para uso do bagaço da cana-de-açúcar na adubação orgânica no estado de Mato Grosso do Sul. **Cadernos de Agroecologia**, v. 5, n. 1, p. 1-4, 2010.

SILVA, R. L. da; PAULA, I. O. de; PATELLI JÚNIOR, J. R.; TORRES, T. R. C.; PEREIRA, T. V. Residual biomasses in the micro-region of Dourados (MS): assessment and availability for energy in agriculture thermal conversion. **Eng. Agrícola**, v.

37, n. 3, p. 433-440, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p433-440/2017>.

SILVA, V. S.; GARCIA, C. de A.; SILVA, C. M. da. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 59-76, 2010.

SOUZA, C. F.; CIRILO, L. da S.; BASTOS, R. G.; PERES, J. G.; OLIVEIRA, A. F. Sonda de TDR para a estimativa de umidade em bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 24-35, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p24-35/2016>.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T. de; ESPÍNDOLA, J. Z.; PEREIRA, R. G. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico do bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 555-566, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p555-566/2015>.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2001. 185 p.

ZANIBONI, P. H.; SCHMIDT, C. A. P. Gestão de resíduos sólidos gerados em uma indústria sucro-alcooleira visando seu correto armazenamento e destinação final. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 195-210, 2014.

ZAPAROLLI, Domingos. Papel de bagaço e palha: empresas usam resíduos de cana-de-açúcar para produzir folhas de sulfite e embalagens. **Pesquisa FAPESP**, n. 263, jan. 2018. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2018/01/16/papel-de-bagaco-e-palha/>. Acesso em: nov. 2017.

*Recebido em: 01/12/2017*

*Aceito em: 05/02/2019*