

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO E DA TAXA DE QUEIMA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS POR MEIO DE UM APLICATIVO DE COMPUTADOR COM COLETA DE DADOS AUTOMATIZADA

EMANUEL RANGEL SPADIM¹, HUMBERTO DE JESUS EUFRADE-JUNIOR¹, NATALIA LAÍS FELISARDO VIEIRA ARRUDA², SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA¹, ELAINE CRISTINA LEONELLO¹

¹ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista –Unesp, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, Cep: 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: emanuel.spadim@unesp.br, hdjejunior@gmail.com, leonelloelaine@hotmail.com, saulo.guerra@unesp.br

² Faculdade de Tecnologia de Botucatu – Fatec Av. José Ítalo Bacchi, s/n - Jardim Aeroporto, Cep:18606-851, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: nfvarruda@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da queima e aprimorar a determinação do índice de combustão de briquetes de biomassa – ICOM, proposto por Quirino e Brito (1991), por meio de um aplicativo de computador com a coleta automatizada dos dados. Foram usados briquetes de toco de eucalipto, casca de algodão, madeira de pinus e bagaço de cana-de-açúcar, que foram especialmente confeccionados para a determinação do novo índice de combustão denominado ICOMa. O ICOMa foi estatisticamente mais sensível que o ICOM na observação da relação entre consumo de massa e geração de calor de materiais com diferentes curvas de temperatura, diferentemente do ICOM. O maior ICOMa foi de 0,97 K h g⁻¹ e o menor de 0,75 K h g⁻¹, enquanto os ICOM (adimensionais) foram de 0,55 e 0,43, respectivamente. A correlação de Pearson entre ICOMa e o tempo para atingir a temperatura máxima foi a maior entre as variáveis avaliadas.

Palavras-chave: Aquisição de dados. Biomassa. Poder calorífico. Taxa de queima.

DETERMINATION OF THE COMBUSTION INDEX AND BURNING RATE OF LIGNOCELLULOSIC WASTE BRIQUETTES THROUGH A COMPUTER APPLICATION WITH AUTOMATED DATA COLLECTION

ABSTRACT: This work evaluated the behavior of the briquettes during burning and to improve the determination of the combustion index of biomass briquettes - ICOM, proposed by Quirino and Brito (1991), through a computer application with automated collection of data. The briquettes used in the tests were cotton bark, eucalyptus stump, sugarcane bagasse and pine wood and were produced specifically for the determination of the new combustion index called ICOMa. ICOMa was more sensitive than ICOM in observing the relationship between mass consumption and heat generation, and allowed to observe statistically significant differences between materials with different temperature curves, different from ICOM. The highest ICOMa was 0.97 K h g⁻¹ and the lowest 0.75 K h g⁻¹, while the ICOM (dimensionless) were 0.55 and 0.43, respectively. The highest Pearson correlation observed for ICOMa occurred with time to reach the maximum temperature.

Keywords: data acquisition, biomass, higher heating value, burning rate.

1 INTRODUÇÃO

A biomassa é a matéria orgânica que pode ser usada para geração de energia, oriunda de animais e vegetais, (BENEDETTI et al., 2006). A biomassa é renovada pela própria natureza, onde o gás carbônico alocado no crescimento do organismo vivo é liberado

durante a decomposição ou a queima (GALBIATI; GALLO; LAVANHOLI, 2010).

A briquetagem é uma técnica usada para o aproveitamento de resíduos agrícolas e consiste no adensamento e diminuição da umidade destes resíduos, o que aumenta a densidade energética e reduz todos os custos

relacionados a transporte (GENDEK et al., 2018).

A lenha pode ser substituída por briquetes em muitas situações, como por exemplo no uso residencial, mas é usada principalmente em todo o setor secundário, normalmente feito em cerâmicas, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis e de cimento (SILVA; CARNEIRO; LOPES, 2017) e tem como vantagem as altas densidades que diminuem a taxa de queima e, conseqüentemente, aumentam a eficiência de combustão, que proporcionam menor emissão de carbono orgânico e elementar quando comparado a combustíveis particulados soltos (SUN et al., 2019). Na China, por exemplo, usando briquetes de biomassa de milho, os impactos da emissão de CO₂ e o esgotamento de combustível fóssil (11 g CO₂ eq./MJ e 2 g óleo eq./MJ, respectivamente) são menores que os de carvão (146 g CO₂ eq./MJ e 26 g óleo eq./MJ, respectivamente) (WANG et al., 2017). O adensamento também gera diminuição dos custos de logísticos da biomassa (ALVARENGA et al., 2016).

Os números de produção de briquetes no Brasil são escassos, o que sugere que a produção seja pequena e ainda não exista uma concentração organizada destas informações em órgãos representantes do setor. Os dados encontrados na literatura são de 2008, onde a produção anual seria de 620 mil toneladas (GENTIL, 2008) e mais recentemente de 2012 onde o Brasil produziria 1,2 milhão de toneladas anuais de briquetes (ABIB, 2012 apud PETRICOSKI, 2017).

A viabilidade do uso de uma determinada biomassa pode ser definida pelo estudo das propriedades de seus briquetes. Um índice geral foi proposto por Quirino e Brito (1991) para caracterização de briquetes, o qual foi denominado ICOM (índice de combustão) pelos autores. Este índice leva em consideração o tempo em que, durante a queima, os briquetes permanecem a uma temperatura superior à 150 °C (medindo-se a temperatura a uma distância padrão da base da chama), a temperatura máxima atingida no ensaio e a perda de massa do briquete durante a queima.

O conceito do ICOM é baseado no desprendimento de energia em uma queima, de

onde se deve esperar que um briquete de boa qualidade forneça altas temperaturas por um longo tempo e consumindo uma pequena quantidade de massa, conforme sugerido por Quirino e Brito (1991), portanto o índice seria diretamente proporcional ao tempo de queima e às temperaturas registradas durante a queima, e inversamente proporcional à quantidade de massa consumida nesta queima.

Parte da caracterização da biomassa consiste, em conhecer suas propriedades energéticas, e o estudo dos briquetes e suas propriedades são uma maneira de conhecer a biomassa que se deseja utilizar e, assim, permitir uma melhor compreensão de seu potencial energético, portanto, este trabalho teve como objetivo aprimorar o índice de combustão de briquetes (aqui denominado ICOMa), usando um aplicativo de computador e sensores de temperatura e carga para facilitar a aquisição dos dados e avaliar o comportamento destes briquetes durante sua queima.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios aconteceram no Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB) localizado na Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, laboratório vinculado ao Instituto de Pesquisas em Bioenergia (IPBEN/Unesp).

2.1 Ensaio laboratorial

2.1.1 Caracterização do material e delineamento experimental

Após realizado o processo da moagem dos materiais, foram tomadas quatro amostras de 200 g de cada material para realização do ensaio de granulometria das biomassas. As biomassas foram levadas a um agitador magnético, em peneiras de malhas de 1,18 mm, 0,425 mm e 0,25 mm.

A umidade do material foi ajustada para 12 % e este material colocado em recipiente com volume conhecido e pesado para a determinação da densidade aparente antes da compactação, para assim ser possível obter seu ganho de densidade após a compactação.

As análises do poder calorífico superior das amostras seguiram metodologia da norma ABNT NBR 8633/84, baseada na liberação de calor na queima da amostra em bomba calorimétrica.

Foi analisado o teor de cinzas (CZ) seguindo a norma ASTM D1102-84 e o teor de materiais voláteis (MV) seguindo a norma ASTM E872-82. O carbono fixo foi determinado pela diferença entre a massa total da amostra e o resultado da soma das análises de materiais voláteis e cinzas, seguindo as diretrizes da norma ASTM E870-82.

2.1.2 O processo de briquetagem

Após a moagem das amostras, seus teores de água foram ajustados para $12 \% \pm 1 \%$ em base seca, usando uma balança determinadora de umidade. O teor de 12% foi escolhido por ser esta a umidade mais utilizada na literatura para produção de briquetes, já que fornece ao combustível sólido prensado as melhores características físicas e energéticas (EUFRADE JUNIOR et al., 2017; GONÇALVES et al., 2013; SILVA et al., 2015).

O processo de ajuste da umidade foi feito borrifando-se água na amostra e agitando-a em intervalos regulares. Esta biomassa foi prensada 24 horas após a umidificação, para que esta umidade se distribuísse na amostra de forma homogênea. Nas situações em que foi necessário diminuir a umidade da amostra, foi separada da totalidade do material uma quantidade necessária a ser seca, a qual foi levada à estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, até atingir peso estável, de forma que quando esta umidade chegasse próxima a zero, a quantidade de água excedente no todo tivesse sido extraída da amostra. Essa parte da amostra era devolvida ao todo e homogeneizada, da mesma forma como foi feito no processo de umificação.

Um molde de aço inoxidável foi construído para se prensar as biomassas e assim obter os briquetes. Este molde é composto por

uma base removível, o próprio corpo do molde, uma haste de compressão e um suporte para remoção do briquete, conforme metodologia utilizada por Chrisostomo (2011). Os briquetes foram produzidos em escala laboratorial. Para isso, foi usada uma prensa hidráulica de pistão acionada por bomba hidropneumática.

A pressão aplicada nas amostras foi de 1200 kgf cm^{-2} , valor próximo ao utilizado em equipamentos comerciais (BIOMAX, 2019) e reproduzida em ensaios de laboratório (EUFRADE JUNIOR et al., 2017).

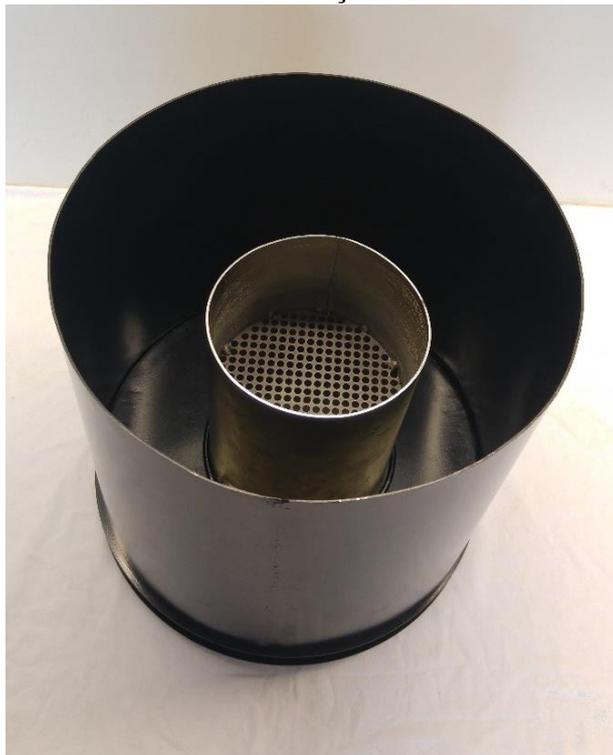
Foram colocadas porções de 20 g no molde e estas foram submetidas a uma força de 11550 kgf, que resulta na pressão desejada para o diâmetro de briquete usado neste ensaio, 35 mm.

Foram produzidos 56 briquetes para cada tipo de biomassa, e levados 14 briquetes à combustão em cada amostragem, sendo feitos, portanto, quatro repetições por biomassa.

2.2 Construção do dispositivo para ensaio

Neste trabalho, um aparelho foi construído para queima e monitoramento da temperatura e consumo de massa dos briquetes, baseado no dispositivo desenvolvido para determinação do ICOM por Quirino e Brito (1991).

Este aparelho tem estrutura em chapa de aço carbono SAE1020 com 2 mm de espessura e é composto por um queimador, um tubo para atenuação do deslocamento de ar e uma base termicamente isolada. O queimador é um recipiente cilíndrico, também em aço, com dois compartimentos separados por uma grade com furos espaçados de 7,1 mm e com 5 mm de diâmetro. Na parte superior ficam acomodados os briquetes a serem analisados, sobre a peneira que dista 90 mm do fundo do queimador, e, na parte inferior, um recipiente com álcool, que é usado como combustível inicial, para dar início à combustão da amostra. O aparelho pode ser visto na Figura 1.

Figura 1. Estrutura do aparelho usado na determinação dos índices de combustão

A estrutura do aparelho foi instalada sobre uma balança de laboratório, da marca Bel, modelo L16001 com precisão de $\pm 0,2$ g, com saída de sinais por protocolo RS232, que foi usada na comunicação com um computador para medição da perda de massa.

Para realizar a medição da temperatura foi utilizado um termopar mineral tipo "k", com precisão de $\pm 0,75$ %, da marca Salcas, com bainha de inox de 400 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro, e um dispositivo de aquisição de dados, modelo NI USB-TC01 da marca National Instruments.

2.3 Aplicativo desenvolvido e método aprimorado para determinação do índice de combustão e taxa de queima

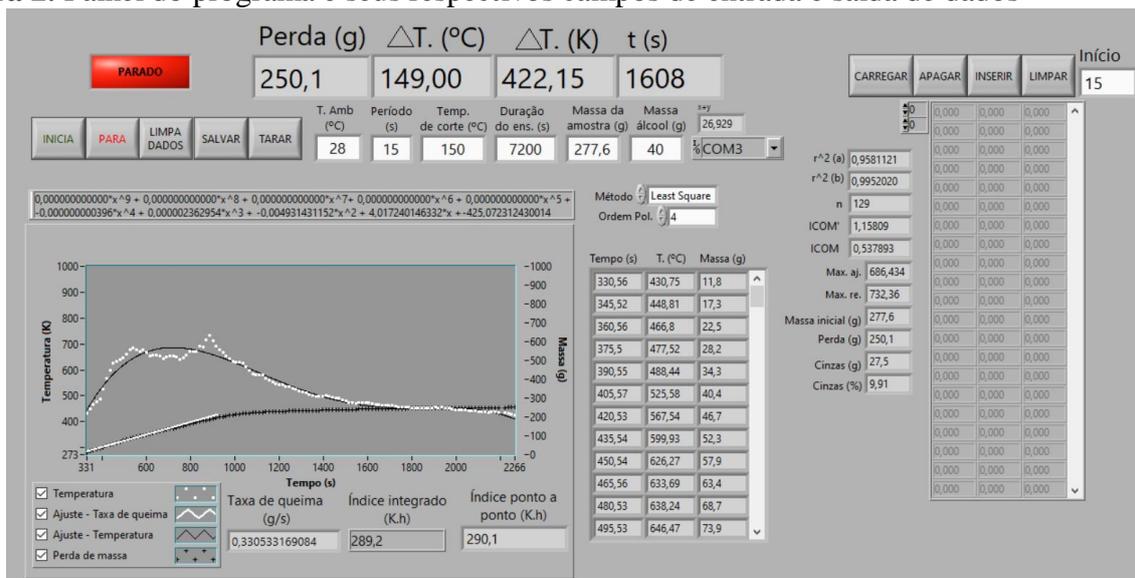
O aplicativo supervisorio foi desenvolvido e testado em formato de instrumentação virtual, em linguagem G, característica do desenvolvedor LabVIEW, não tendo sido criado o arquivo executável e

instalador, portanto os requisitos mínimos necessários aqui definidos para garantir o funcionamento são os do próprio desenvolvedor, que são um processador Pentium 4M ou equivalente, 1 GB de memória RAM, sistemas operacionais Windows 8.1/8/7/Vista (32-bit e 64 bit), Windows XP SP3(32-bit), Windows Server 2008 R2 (64-bit) ou Windows Server 2003 R2 (32-bit), espaço livre em disco de 3,5 GB, e Adobe reader instalado para leitura de manuais.

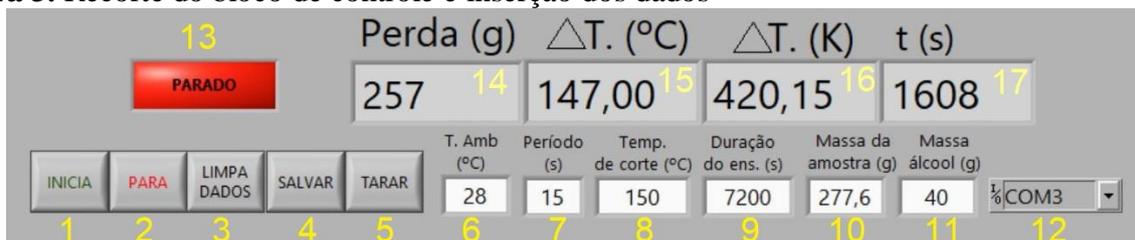
O aplicativo fornece instantaneamente os índices de combustão (ICOM e ICOMa) e também os gráficos do processo, podendo serem salvos e exportados para planilha eletrônica.

O registro dos dados foi feito em períodos regulares de 15 segundos para todos os testes.

A Figura 2 traz uma visão geral do painel principal do programa desenvolvido neste trabalho para determinação do ICOMa.

Figura 2. Painel do programa e seus respectivos campos de entrada e saída de dados

Na parte superior do painel encontram-se os itens de controle, que estão discriminados na Figura 3 e explicados a seguir.

Figura 3. Recorte do bloco de controle e inserção dos dados

1 – Inicia a observação para coleta dos dados; 2 – Pára a coleta dos dados; 3 – Limpa os dados coletados e mostrados no gráfico; 4– Salva os dados coletados; 5– Tara a balança; 6 – Campo para inserção da temperatura ambiente; 7 – Campo para inserção do período de coleta; 8 – Campo para inserção da temperatura de início de coleta dos dados após combustão dos briquetes; 9 – Campo para inserção da duração máxima do ensaio; 10 – Campo para inserção da Massa inicial da amostra ; 11 – Massa de álcool (lembrar de especificar o álcool usado); 12 – Seleciona a porta serial que receberá os dados da balança; 13 – Indicador do estado do programa 14 – Indicador da perda de massa durante o ensaio; 15 – Variação de temperatura de combustão em graus Celsius 16 – Variação de temperatura de combustão em Kelvin 17 – Tempo de ensaio decorrido, em segundos.

Os itens gráficos, representações matemáticas, legendas e dados coletados estão na Figura 4.

Figura 5. Bloco de inserção de dados já coletados e saída de dados

1 – Carrega dados já existentes na tabela 17; 2 – Apaga linhas indesejadas; 3 – Insere no gráfico 5 e tabela 4 da Figura 4 os dados carregados; 4 – Limpa os dados da tabela 17; 5 – Define a partir de qual linha os dados serão inseridos; 6 – r^2 do ajuste polinomial da temperatura em função do tempo; 7 r^2 do ajuste da taxa de queima em função do tempo; 8 – Número de amostras; 9 – ICOMa; 10 – ICOM; 11 – valor máximo encontrado no ajuste da curva de temperatura; 12 – Valor máximo encontrado nos dados reais coletados; 13 – Massa inicial da amostra em g; 14 – Perda de massa em g; 15 – Cinzas restantes no queimador ao fim do ensaio em g; 16 – Cinzas restantes no queimador ao fim do ensaio em %; 17 – Tabela com os dados carregados.

O ICOM como proposto por Quirino e Brito (1991) é obtido pela aplicação da equação 1.

$$ICOM = \frac{A \times B}{100 \times C} \quad (1)$$

Em que:

ICOM: Índice de combustão, adimensional

A: Porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150 °C, tomada em relação ao tempo total de 120 min., %

B: Porcentagem da temperatura máxima atingida no teste em relação à temperatura de 150 °C, %

C: Porcentagem de massa total consumida gerando temperaturas acima de 150 °C, %

O ICOMa foi definido pelo monitoramento da temperatura de queima, onde a coleta de dados era iniciada quando a variação com relação à temperatura inicial atingia 150 °C, repetindo o procedimento original de determinação do ICOM. Este processo permitiu eliminar erros de perda de massa relativos ao álcool consumido na chama inicial usada para ignição dos briquetes, bem como permitiu atenuar erros do calor gerado nesta ignição, já que a coleta de dados iniciava-se quando a massa de álcool já havia sido consumida.

Após o início da coleta dos dados, a cada 15 segundos a perda de massa e temperatura foram registradas. A temperatura foi usada para o ajuste de um modelo polinomial de quarta ordem pelo método dos

mínimos quadrados, e a perda de massa usada para determinação da massa total consumida e da taxa de queima.

O ICOMa foi calculado pelo programa usando a equação 1, proposta neste trabalho, por representar uma relação entre a integral definida da temperatura em função do tempo entre os pontos onde a temperatura está acima de 150 °C e o consumo de massa.

O ICOM é adimensional, por usar as variáveis todas em unidades percentuais, mas sua representação poderia ter unidade de medida igual à do ICOMa, da equação 2, uma vez que os elementos usados para eliminar tais unidades de medida são iguais em todos os casos (temperatura de 150 °C e o tempo de 120 minutos), comportando-se como constantes. Isso permitiu que as variações das grandezas fossem comparáveis entre métodos quando percebidas diferenças entre ICOMa de biomassas dentro de um método.

$$ICOMa = \frac{1}{3600 \times m} \int_a^b \Delta T(t) dt \quad (2)$$

Em que:

ICOMa: Índice de combustão, K h g⁻¹;

a: momento em que a variação de temperatura da amostra supera os 150 °C, s

b: momento em que a variação de temperatura da amostra arrefece a 150 °C, s

ΔT : variação de temperatura da amostra, K

t: tempo de ensaio decorrido, s

m: massa consumida acima de 150 °C, g

Para cada amostragem de biomassa feita no dispositivo de determinação do ICOMa, foi gerada uma regressão da perda de massa em função do tempo, tomada do início da coleta dos dados até o momento de máxima temperatura ajustada, seguindo o modelo mostrado na equação 3.

$$\hat{y} = at + b \quad (3)$$

Em que,

\hat{y} : perda de massa estimada em função do tempo, g

a: parâmetro angular, correspondente à taxa de queima, g s⁻¹

t: tempo decorrido desde o início da coleta de dados, s

b: parâmetro linear, g

As equações foram aplicadas pelo aplicativo durante a queima da biomassa. A Figura 6 mostra o computador e o programa desenvolvido neste trabalho para determinação do ICOMa em um ensaio de queima dos briquetes.

Figura 6. Dispositivos usados na determinação do ICOM durante a queima de briquetes



2.4 Determinação do icom e icoma e taxa de queima

Para garantir um controle das variáveis e uma consequente condição similar na combustão, os briquetes foram dispostos da mesma forma no queimador em todos os ensaios. O álcool usado para a ignição foi colocado em um recipiente de alumínio sob a peneira do queimador.

Diferentemente do trabalho de Quirino e Brito (1991), no qual foram utilizados 14 ml de álcool, aqui usou-se 40 g de álcool etílico P.A. de 0,8 g mL⁻¹ de densidade. Os testes preliminares demonstraram que aquela quantidade não seria suficiente para iniciar a queima das biomassas utilizadas nas condições aqui propostas, possivelmente por ser mais lenta a ignição da madeira em relação ao carvão.

Seguindo as diretrizes do trabalho de Quirino e Brito (1991), os briquetes foram queimados e suas perdas de massa e temperaturas foram monitoradas no intervalo de tempo em que o conjunto esteve acima de 150 °C. Neste experimento a temperatura foi a variável que determinou o fim do ensaio em todas as queimas, já que todos os briquetes ensaiados arrefeceram aos 150 °C antes de atingir 120 minutos de ensaio, tempo este determinado pelos autores como o tempo máximo de coleta.

2.5 Determinação das densidades e porosidade

Após a compactação dos materiais, suas densidades aparentes foram determinadas pela relação entre a massa e o volume dos briquetes, de acordo com metodologia adaptada da norma ABNT NBR 6922/81.

A porosidade foi obtida indiretamente, usando o método adaptado definido pela Embrapa (1997) para determinação da porosidade dos solos. Este método consiste em determinar a densidade das partículas de em um elemento descontando seus vazios, fazendo-se a relação entre a densidade das partículas e a

densidade do solo em seguida, como na equação 4.

$$P = \frac{(Dp-D)}{D} \quad (4)$$

Em que,

P – Porosidade, %.

Dp – Densidade das partículas, g cm⁻³

D – Densidade do briquete, g cm⁻³

2.6 Análise estatística

Com a comparação das variáveis oriundas da análise química imediata, do poder calorífico superior e do ensaio do ICOM e ICOMa, foi gerada uma matriz de correlação de Pearson, bem como seus valores p .

Após confirmadas a homogeneidade da variância dos resíduos pelo teste de Bartlett (1937) e da sua normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), foi feita uma análise de variância (ANOVA) e, observada diferença estatística de média, esta análise foi complementada pelo teste de comparação de médias de Tukey (1949), com os valores de ICOM encontrados para cada biomassa ensaiada. Neste caso, a biomassa foi considerada tratamento no teste. O mesmo procedimento foi feito para com o ICOMa. Considerou-se significativamente diferentes as situações onde p -valor < 0,05. Com este procedimento, foi possível mostrar que diferenças de resultado que ocorreram entre biomassas usando-se o método do ICOMa podem não ocorrer quando usando o método do ICOM, mostrando, assim, uma diferença de sensibilidade entre os dois índices.

Os procedimentos estatísticos usados neste trabalho foram executados pelo software R (BUNN; KORPELA, 2014).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição das médias das granulometrias dos materiais antes da briquetagem está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição granulométrica das biomassas antes da briquetagem

	Abertura da malha da peneira (mm)			
	1,18	0,425	0,25	<0,250
	Granulometria (%)			
Casca de algodão	78,8 (2,6)	15,8 (1,9)	2,2 (0,1)	3,2 (0,8)
Bagaço de cana-de-açúcar	0 (<0,1)	78 (0,1)	8,1 (<0,1)	13,9 (0,1)
Madeira de Pinus	0,6 (0,2)	60,5 (0,5)	20,8 (0,5)	18,2 (1,0)
Toco de eucalipto	0 (<0,1)	62,2 (0,7)	17 (0,4)	20,8 (0,7)

Valores obtidos pela média de quatro amostras. Erro padrão entre parênteses

Em sua maioria, as biomassas tiveram a maior parte de seu material retido entre as peneiras de 1,18 mm e 0,425 mm, sendo a única exceção a casca de algodão, que teve a maior parte do material retido já na peneira de

1,18 mm por ter fibras que se aglomeraram e não passaram pela peneira.

O poder calorífico superior e a análise química imediata das amostras estão na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química imediata e poder calorífico superior

Biomassa	Carbono fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	PCS (MJ kg ⁻¹)
Casca de algodão	21,9 (0,10)	75,2 (0,1)	2,8 (0,01)	16,6 (0,05)
Bagaço de cana-de-açúcar	14 (0,22)	80,9 (0,13)	5,1 (0,10)	16,9 (0,11)
Madeira de pinus	16 (0,13)	83,7 (0,13)	0,2 (0,01)	17,4 (0,02)
Madeira de toco de eucalipto	21,3 (0,33)	77,2 (0,32)	1,5 (0,02)	17,9 (0,07)

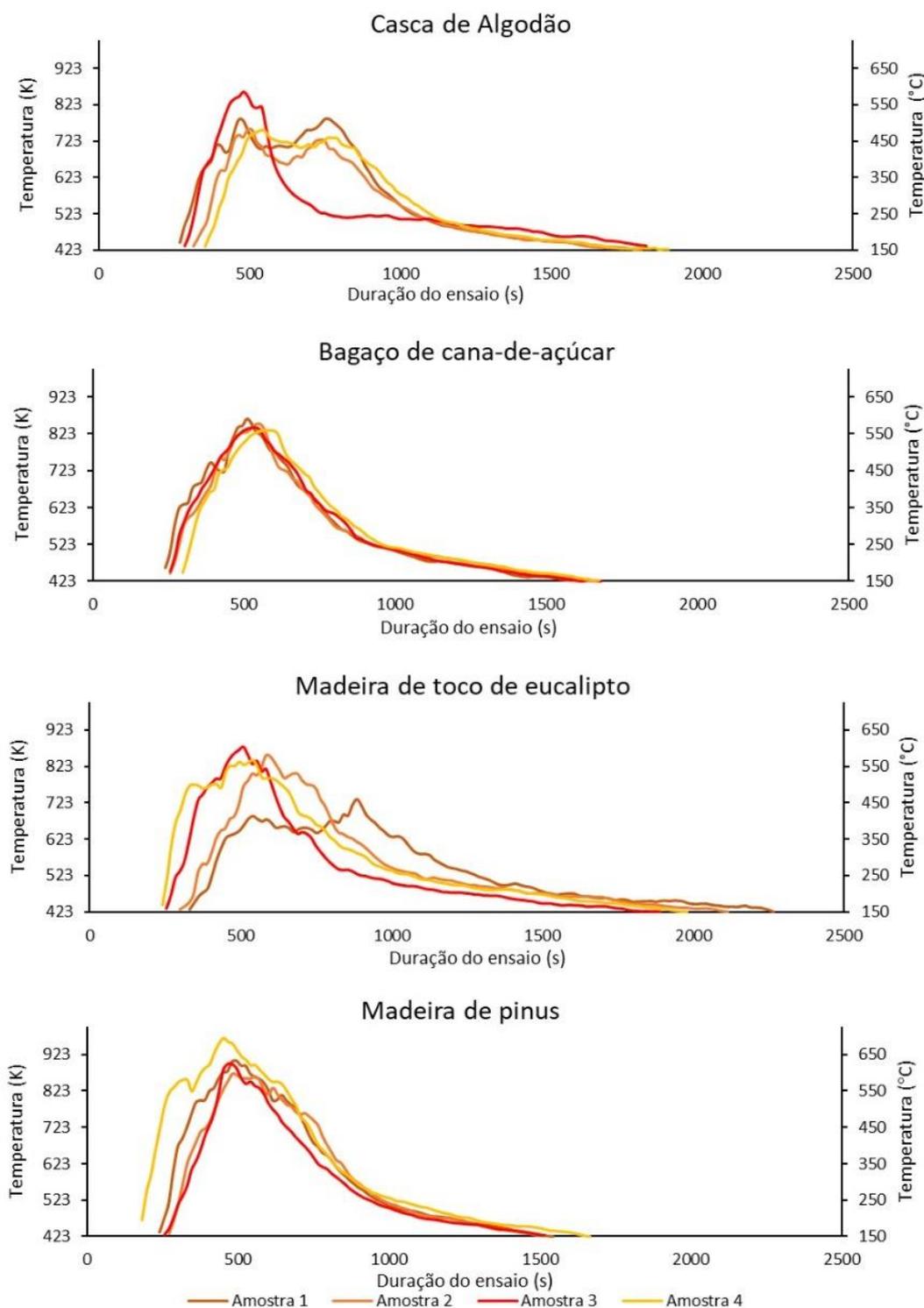
Valores obtidos pela média de quatro amostras. Erro padrão entre parênteses

O teor de carbono fixo tem relação positiva com o poder calorífico, tendo este também relação positiva com o teor de materiais voláteis, sendo a relação menor neste caso que naquele. Já para o teor de cinzas, a relação com o poder calorífico é negativa (DEMIRBAŞ, 1997). Em geral, este comportamento foi o encontrado nas biomassas aqui estudadas.

O fato de a relação sugerida por Demirbaş (1997) na comparação entre análise elementar e poder calorífico não serem observadas nas biomassas de casca de algodão

e de bagaço de cana-de-açúcar é possivelmente explicado pelo fato de haver pouca diferença entre as médias de seus PCS's e pelo erro padrão relativamente alto na amostragem da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar.

Na Figura 7 pode-se observar que as curvas de temperatura apresentaram variação em suas formas. Tais variações vão ao encontro da hipótese de que o ICOM, calculado pela equação 1, teria sua sensibilidade prejudicada com a variação da forma da regressão da temperatura.

Figura 7. Curvas de temperatura das biomassas em função do tempo de queima

3.1 Índices de combustão (icom e icoma)

Foi realizada análise de variância (ANOVA) para os dois métodos de cálculo do índice de combustão (ICOM e ICOMa). O método do ICOM não apresentou diferença

entre as biomassas ao nível de significância de 5 %, diferentemente do ICOMa. Na sequência procedeu-se com um teste de Tukey para comparação de médias neste último método. Os resultados dos testes podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Médias de ICOM e ICOMa

Biomassa	ICOM	ICOMa (K h g⁻¹)
Madeira de toco de eucalipto	0,55 (0,06) a	1,33 (0,04) a
Casca de algodão	0,43 (0,04) a	1,19 (0,02) ab
Bagaço de cana-de-açúcar	0,46 (0,01) a	1,05 (0,02) bc
Madeira de pinus	0,49 (0,04) a	1,01 (0,03) c

Médias acompanhadas de mesmas letras não diferem estatisticamente entre si nas colunas, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Valores obtidos pela média de quatro amostras. Erro padrão entre parênteses.

No método de cálculo do ICOMa houve uma diferença estatisticamente significativa entre a biomassa de madeira de toco de eucalipto e as biomassas de madeira de pinus e bagaço de cana-de-açúcar, assim como entre a casca de algodão e a madeira de pinus, que não foram reveladas pelo método do ICOM. A

variabilidade maior observada no ICOM em relação ao ICOMa é influenciada pela pequena quantidade de amostras, que, por sua vez, influencia no teste estatístico. Desta forma, os resultados obtidos com o ICOMa sugerem que este método tem melhor sensibilidade para amostras pequenas (Tabela 4).

Tabela 4. Densidades, porosidades e taxas de queima

	Toco de eucalipto	Madeira de pinus	Casca de algodão	Bagaço de cana-de-açúcar
Densidade aparente a 12 % de umidade antes da compressão (g cm ⁻³)	0,24 (0,01)	0,31 (0,01)	0,25 (0,01)	0,15 (<0,01)
Densidade das partículas (g cm ⁻³)	1,61 (<0,01)	1,49 (0,02)	1,56 (0,05)	1,61 (<0,01)
Densidade aparente do briquete a 12 % de umidade (g cm ⁻³)	0,93 (<0,01)	0,91 (<0,01)	1,02 (<0,01)	1,05 (<0,01)
Porosidade do briquete (%)	40,55 (0,03)	39,08 (0,01)	36,51 (0,01)	34,95 (0,01)
Taxa de queima (g s ⁻¹)	0,50 (0,06)	0,55 (0,02)	0,44 (0,02)	0,59 (0,01)

Valores obtidos pela média de quatro amostras. Erro padrão entre parênteses

Para efeito de caracterização da amostra, a porosidade dos briquetes foi avaliada, pelo fato de esta característica ter relação com a densidade do briquete, sendo menor a porosidade quanto mais adensado for um mesmo material.

A alta compactação diminui a taxa de queima de combustíveis sólidos prensados por diminuir o fluxo de oxigênio no interior do briquete durante a queima (DAVIES, 2013; ONUBUGU; EKPUNOBI, 2011).

A maior compactação observada foi a do bagaço de cana-de-açúcar, que reduziu seu volume em sete vezes, seguido da casca de algodão, madeira de toco de eucalipto e madeira de pinus, que tiveram seus volumes reduzidos em 4,08; 3,88 e 2,94 vezes, respectivamente.

Uma análise dos dados foi realizada usando-se a matriz de correlação de Pearson, mostrada na Tabela 5.

Tabela 5. Matriz de correlação de Pearson e valores *p*

A										
-0,65										
(0,006)	B									
-0,74	0,29									
(0,001)	(0,283)	C								
0,74	-0,66	-0,47								
(0,001)	(0,005)	(0,067)	D							
-0,77	0,67	0,66	-0,83							
(*)	(0,004)	(0,006)	(*)	E						
-0,66	0,65	0,69	-0,68	0,72						
(0,006)	(0,006)	(0,003)	(0,004)	(0,002)	F					
0,32	0,18	-0,74	0,03	-0,33	-0,21					
(0,228)	(0,508)	(0,001)	(0,915)	(0,218)	(0,427)	G				
0,47	-0,73	-0,29	0,64	-0,53	-0,86	-0,31				
(0,064)	(0,001)	(0,283)	(0,007)	(0,036)	(*)	(0,237)	H			
0,21	-0,62	-0,18	0,54	-0,53	-0,74	-0,07	0,76			
(0,427)	(0,010)	(0,503)	(0,031)	(0,034)	(0,001)	(0,799)	(0,001)	I		
-0,55	0,29	0,42	-0,41	0,65	0,06	-0,3	0,1	0,22		
(0,028)	(0,268)	(0,106)	(0,111)	(0,007)	(0,84)	(0,267)	(0,711)	(0,410)	J	
0,30	-0,64	-0,17	0,54	-0,52	-0,75	-0,11	0,79	0,94	0,27	
(0,26)	(0,006)	(0,529)	(0,031)	(0,039)	(*)	(0,673)	(*)	(*)	(0,320)	K

Coefficientes com módulo acima de 0,70 destacados em negrito. *p* valor entre parênteses e considerado significativo ao nível de 0,05.

A: Massa de material remanescente no queimador em relação à massa inicial após o término do ensaio

B: Consumo de massa durante a queima (taxa de queima)

C: Poder calorífico superior

D: tempo em que a temperatura chega aos 150 °C

E: temperatura máxima registrada durante o ensaio

F: Materiais voláteis método da análise imediata

G: Cinzas pelo método da análise imediata

H: Carbono fixo pelo método da análise imediata

I: tempo até atingir a temperatura máxima

J: Índice de combustão pelo método de Quirino e Brito (1991) (ICOM)

K: Índice de combustão aprimorado (ICOMa)

*: *p* valor menor que 0,001

A correlação entre teor de carbono fixo (H) e de materiais voláteis (F) está entre as mais altas, mas dispensa discussão por ser uma relação esperada, já que a biomassa é composta quase que totalmente por estes materiais e, portanto, estes são complementares.

A correlação entre o tempo em que a temperatura chega aos 150 °C (D) e a temperatura máxima registrada durante o ensaio (E) também foi bastante alta, o que pode levar à interpretação de que uma biomassa que tem rampa de aquecimento acentuada chegará a maiores temperaturas, mas esta correlação também pode acontecer em razão da baixa temperatura de ignição, que pode ter promovido

uma combustão concomitante dos briquetes, fazendo altas tanto a taxa de crescimento da temperatura quanto a temperatura máxima atingida.

A massa de material remanescente no queimador em relação à massa inicial após o término do ensaio (A) apresentou correlações consideráveis com o PCS (C), com o tempo em que a temperatura chega aos 150 °C (D) e com a temperatura máxima registrada durante o ensaio (E). A correlação negativa observada entre a Massa de material remanescente no queimador em relação à massa inicial após o término do ensaio (A) e o PCS (C) se dá em razão da não contribuição dos minerais para a

geração de calor (DEMIRBAŞ, 1997; HOSSEINPOUR et al., 2017; UZUN et al., 2017).

O tempo em que a temperatura chega aos 150 °C (D) mostrou correlação positiva com o teor de carbono fixo (H) e negativa com o teor de materiais voláteis (F), ou seja, materiais com maior concentração de carbono fixo levaram mais tempo até atingir a temperatura máxima, enquanto aqueles com maior concentração de materiais voláteis atingiram altas temperaturas mais rapidamente.

Para o carvão, a temperatura de ignição diminui com o aumento da concentração de materiais voláteis (CHEN; MORI; PAN, 1995; SUN; ZHANG, 1998). De forma mais genérica, esta característica pode ser estendida para a biomassa (GROTKJÆR et al., 2003).

Estudos na Índia envolvendo resíduos sólidos de municípios também mostraram que seu maior teor de material volátil facilitou a ignição em mistura com carvão (MUTHURAMAN; NAMIOKA; YOSHIKAWA, 2010)

É razoável assumir que a baixa temperatura de ignição de biomassas com alta concentração de materiais voláteis as faz entrar em combustão mais rapidamente, atingindo mais rapidamente a temperatura máxima.

Esta interpretação também ajuda a explicar a correlação vista entre o ICOMa (K) e as concentrações de carbono fixo (negativa) e de materiais voláteis (positiva).

Os materiais voláteis são os primeiros a serem queimados em uma combustão homogênea (ESSENHIGH; MISRA; SHAW, 1989), combustão esta que é a mais provável de ter ocorrido nas condições deste ensaio, considerados o tamanho das partículas dos briquetes e a baixa taxa de aquecimento na ignição.

A rápida queima dos voláteis pode gerar um pico de calor que também se resfriará mais rapidamente (MUTHURAMAN; NAMIOKA; YOSHIKAWA, 2010), o que pode influenciar na área sob a curva de temperatura considerada na determinação do ICOMa. O contrário também ocorre para materiais com maior teor de carbono fixo, que não atingem valores tão altos de temperatura, mas que têm um aquecimento e resfriamento mais demorado

mantendo o despreendimento de calor por mais tempo, o que produz uma curva de temperatura mais plana e ampla, que determinou a alta correlação entre o tempo até atingir a temperatura máxima (I) e ICOMa (K).

Uma outra situação que concorda com estas proposições é a observação da correlação inversa ocorrida entre a taxa de queima (B) e a concentração de carbono fixo da biomassa (H), e direta, apesar de pequena, observada em relação ao teor de materiais voláteis (F).

Ensaio com girassol, colza, resíduo de algodão e resíduo de oliva mostraram que uma maior concentração de materiais voláteis promoveu temperaturas mais altas (SAIDUR et al., 2011), corroborando com a correlação alta e positiva mostrada na Tabela 5.

A correlação entre o tempo até atingir a temperatura máxima (I) e o ICOMa (K) foi a maior encontrada, ou seja, as biomassas que promovem taxas de ganho de temperatura menores são aquelas que têm maior ICOMa. Estas características têm aplicação prática no projeto e planejamento da alimentação de máquinas térmicas alimentadas por biomassa.

O PCS (C) não apresentou correlação com o ICOMa.

As demais variáveis analisadas não apresentaram correlações importantes com o ICOM.

4 CONCLUSÃO

O dispositivo e aplicativo desenvolvidos foram eficazes para determinar os índices de combustão, assim como o foram na realização de seu cálculo, possibilitando fazê-lo de forma automática.

O uso do aplicativo possibilitou a criação de um índice que é resultado de cálculos complexos e trabalhosos de se fazer sem o auxílio de um aplicativo. O aplicativo permitiu ainda acompanhar o processo em tempo real, facilitando a interpretação dos resultados pela observação dos eventos físicos, que podem ser imediatamente associados aos resultados mostrados na tela do computador.

A relação vista entre a temperatura e a perda de massa na combustão (que são as grandezas relacionadas diretamente ao ICOM e ICOMa) diferiram estatisticamente entre as

biomassas de toco de eucalipto e as biomassas de bagaço de cana-de-açúcar e madeira de pinus, quando do uso do método do ICOMa. Tal comportamento não foi observado quando do uso do ICOM, que indicou não haver diferença estatisticamente significativa entre as biomassas. Isso permite observar que há diferença de sensibilidade entre os métodos.

O ICOMa aumenta com o aumento do tempo até atingimento da temperatura máxima no ensaio de queima, e esta foi a maior correlação encontrada.

Biomassas com maiores concentrações de carbono fixo apresentaram maior ICOMa. Esta relação aconteceu de forma inversa quando

comparada à concentração de materiais voláteis.

A taxa de queima decresce com o aumento da concentração de carbono fixo na biomassa.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na agricultura da FCA-Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP), ao LABB - Laboratório Agroflorestral de Biomassa e Bioenergia e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

6 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, T. H. D. P.; SARTORI, S.; CAMPOS, L. M. D. S.; RODRIGUEZ, C. M. T. Briquette production and its contribution for the energy sustainability: a case study in Brazil. **Espacios**, Caracas, v. 37, n. 13, p. 18, 2016. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a16v37n13/16371318.html>. Acesso em: 24 jan. 2021.

BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society A – Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, Berks, v. 160, n. 901, p. 268-282, 1937. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1937.0109>. Acesso em: 11 dez. 2019.

BENEDETTI, O.; PLÁ, J. A.; RATHMANN, R.; PADULA, A. D. Uma proposta de modelo para avaliar a viabilidade do biodiesel no Brasil. **Teoria e Evidência Econômica**, Passo Fundo, v. 14, p. 81-107, 2006. Disponível em: http://aoatools.uaa.gr/pilotec/files/bibliography/brasil_rev_esp_2006_art4-2809991936/brasil_rev_esp_2006_art4.pdf. Acesso em: 1 jun. 2019.

BIOMAX. **O que é briquetagem**. São Leopoldo: Biomax, 2019. Disponível em: <https://www.biomaxind.com.br/briquetagem/>. Acesso em: 1 jun. 2019.

BUNN, A.; KORPELA, M. **Crossdating in dplR**. Processed with dplR 1.6.0 in R version 3.0.2. [S. l.]: R Core Team, abr. 2014. Disponível em: <https://cran.microsoft.com/snapshot/2014-09-08/web/packages/dplR/vignettes/xdate-dplR.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2020.

CHEN, Y.; MORI, S.; PAN, W. P. Estimating the combustibility of various coals by TG-DTA. **Energy and Fuels**, Washington, v. 9, n. 1, p. 71-74, 1995. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ef00049a011>. Acesso em: 21 dez. 2019.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1164>. Acesso em: 1 fev. 2019.

DAVIES, R. Ignition and burning rate of water hyacinth briquettes. **Journal of Scientific Research**

and Reports, London, v. 2, n. 1, p. 111-120, 2013. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/280102951>. Acesso em: 12 dez. 2019.

DEMIRBAŞ, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel and Energy**

Abstracts, London, v. 76, n. 5, p. 431-434, 1997. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236197855202>. Acesso em: 23 ago. 2020.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA: CNPS, 1997. Disponível em:

https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf. Acesso em: 1 mar. 2019.

ESSENHIGH, R. H.; MISRA, M. K.; SHAW, D. W. Ignition of coal particles: a review.

Combustion and Flame, Pittsburgh, v. 77, n. 1, p. 3-30, jul. 1989. DOI:

[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90101-6). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010218089901016?via%3Dihub>. Acesso em: 24 out. 2019

EUFRADE JUNIOR, H. J.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M.; GUERRA, S. P. S.;

BALLARIN, A. W. Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 108, p. 636-640, dez. 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.025>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669017304867?via%3Dihub>. Acesso em: 11 set. 2019.

GALBIATI, J. K.; GALLO, C. A.; LAVANHOLI, M. G. D. P. Produção de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar. **Nucleus**, Logroño, v. 7, n. 1, p. 127-138, abr. 2010. DOI:

<https://doi.org/10.3738/1982.2278-319>. Disponível em:

<http://www.nucleus.feituverava.com.br/index.php/nucleus/article/view/319/376>. Acesso em: 16 ago. 2018.

GENDEK, A.; ANISZEWSKA, M.; MALAŤÁK, J.; VELEBIL, J. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species.

Biomass and Bioenergy, Oxford, v. 117, p. 173-179, out. 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.025>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953418301958?via%3Dihub>. Acesso em: 19 ago. 2018.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4499/1/2008>

_LuizVicenteBocornyGentil.pdf. Acesso em: 24 jan. 2021.

GONÇALVES, B. F.; YAMAJI, F. M.; FERNANDEZ, B. O.; RÓZ, A.; FLORIANO, F. S.

Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de *Eucalyptus grandis* para confecção de briquetes. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 205-213, 2013. Disponível em:

<https://www.ingentaconnect.com/content/doi/101032674/2013/00000025/00000002/art00006#Refs>. Acesso em: 5 out. 2018.

GROTKJÆR, T.; DAM-JOHANSEN, K.; JENSEN, A. D.; GLARBORG, P. An experimental study

of biomass ignition. **Fuel**, Amsterdam, v. 82, n. 7, p. 825-833, maio 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00369-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236102003691?via%3Dihub>. Acesso em: 11 set. 2019.

HOSSEINPOUR, S.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; MEHRPOOYA, M. Estimation of biomass higher heating value (HHV) based on the proximate analysis by using iterative neural network-adapted partial least squares (INNPLS). **Energy**, Amsterdam, v. 138, p. 473-479, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.075>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217312513?via%3Dihub>. Acesso em: 12 nov. 2019.

MUTHURAMAN, M.; NAMIOKA, T.; YOSHIKAWA, K. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste. **Bioresource Technology**, New York, v. 101, n. 7, p. 2477-2482, abr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085240901565X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jun. 2019.

ONUEGBU, T.; EKPUNOBI, U. Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend. **IJRRAS**, Ammapalayam, v. 7, n. 2, p. 153-159, maio 2011. Disponível em: https://www.arpapress.com/Volumes/Vol7Issue2/IJRRAS_7_2_08.pdf. Acesso em: 16 out. 2019.

PETRICOSKI, S. M. **Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2969/5/Silvia%20Macarri%20Petricoski.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2021.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília, DF: LPF, 1991. (Série Técnica, n. 13). Disponível em: <http://mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2019.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIRBAS, A.; HOSAIN, M. S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, jun. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111000578?via%3Dihub>. Acesso em: 19 set. 2020.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, dez. 1965. DOI: <https://doi.org/10.2307/2333709>. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2333709?origin=crossref&seq=1>. Acesso em: 12 dez. 2019.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L., YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 713-722, jan. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v45i4.39700>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/39700>. Acesso em: 18 dez. 2020.

SILVA, J. W. F.; CARNEIRO, R. A. F.; LOPES, J. M. L. Da biomassa residual ao briquete:

viabilidade técnica para produção de briquetes na microrregião de dourados-ms. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 624-646, 2017. DOI:

<http://dx.doi.org/10.5380/rber.v6i4.46401>. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46401>. Acesso em: 15 set. 2019.

SUN, C. L.; ZHANG, M. Y. Ignition of coal particles at high pressure in a thermogravimetric analyzer. **Combustion and Flame**, Amsterdam, v. 115, n. 1-2, p. 267-274, out. 1998. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(97\)00350-7](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(97)00350-7). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010218097003507?via%3Dihub>. Acesso em: 14 maio 2020.

SUN, J.; SHEN, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; WANG, F.; WANG, T.; CHANG, X.; LEI, Y.; XU, H.; CAO, J.; ZHANG, N.; LIU, S.; LI, X. Effects of biomass briquetting and carbonization on PM2.5 emission from residential burning in Guanzhong Plain, China. **Fuel**, Amsterdam, v. 244, p. 379-387, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.031>. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.031>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119302352?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jul. 2019.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, DC, v. 5, n. 4, p. 99-114, 1949. DOI: <https://doi.org/10.2307/3001913>. Disponível em:

<https://www.jstor.org/stable/3001913?origin=crossref&seq=1>. Acesso em: 23 nov. 2019.

UZUN, H.; YILDIZ, Z.; GOLDFARB, J. L.; CEYLAN, S. Improved prediction of higher heating value of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis.

Bioresource Technology, New York, v. 234, p. 122-130, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417302857?via%3Dihub>. Acesso em: 17 set. 2020.

WANG, Z.; LEI, T.; YANG, M.; LI, Z.; QI, T.; XIN, X.; HE, X.; AJAYEBI, A.; YAN, X. Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 192, p. 83-94, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.071>. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.071>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917300892?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jan. 2021.