

EMANUEL RANGEL SPADIM

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AUTOMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO
DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES**

Botucatu

2020

EMANUEL RANGEL SPADIM

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AUTOMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO
DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para
obtenção do título de Mestre em Agronomia –
Energia na Agricultura

Orientador: Prof. Dr. Saulo P. S. Guerra

Botucatu
2020

S732d

Spadim, Emanuel Rangel

Desenvolvimento de dispositivo automático para determinação do índice de combustão de briquetes / Emanuel Rangel Spadim. --

Botucatu, 2020

67 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra

1. Energia Fontes Alternativas. 2. Briquetes Biomassa. 3. Poder calorífico. 4. Aplicativo Aquisição de dados. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

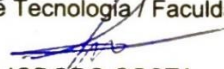
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO AUTOMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES

AUTOR: EMANUEL RANGEL SPADIM

ORIENTADOR: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA
Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA
Departamento de Física e Biofísica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP


Pós-doutorando HUMBERTO DE JESUS EUFRADE JUNIOR
PPGA Energia na Agricultura / Unesp FCA

Botucatu, 19 de fevereiro de 2020

Aos meus pais,
Mário e Maria das Graças,
dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mario e Maria das Graças, por serem meus melhores amigos e por me ensinarem sempre, em palavras e pelo exemplo, a ser alguém melhor.

A Gabriela, Wellington, e Letícia Spadim, por serem essa família da qual tanto gosto.

Ao meu orientador, Saulo Guerra, pelo apoio e atenção em todos os momentos, dentro e fora da universidade.

À minha chefe, Maura Esperancini, por me apoiar durante todo o mestrado.

À Letícia Vieira, por incentivar o início deste trabalho e por estar sempre presente me ajudando a seguir na universidade e fora dela.

Ao Marcelo Denadai, pela grande amizade e pela parceria de sempre.

À Livia Campos, pela grande amizade e pela ajuda técnica.

À Natália Arruda, pela amizade e grande ajuda na execução do trabalho.

À Letícia Cury, pela amizade e pela ajuda na formatação deste trabalho.

A Humberto e Letícia, pela amizade de ambos e pela ajuda técnica do Humberto, um exemplo a ser seguido na área acadêmica.

A Romulo Leonardo, Luiz Balestrin e Indiamara Marasca, pela grande amizade e pelo incentivo.

À Elaine Leonello, pela convivência e pelas ajudas pontuais.

Ao Leonardo França, pela amizade, pela ajuda e pelos incentivos.

A todos os amigos que passaram pelo NEMPA, em especial Prof. Kleber Lanças, Miguel Pascucci, Fábio Lopes, Fernanda Drudi, Jefferson Sandi, Aldir Carpes, Michel Moura e Murilo Martins.

A todos os amigos do LABB, em especial a Renan Mangialardo, Ana Carolina Costa, Mariana Montelatto, Carla Brito, Bruna Ferregutti, Julia Faria, João Pedro Baggio, Gustavo Lopes, André Vitor Manso, Guilherme Oguri, Samara Maschetti, Gabriela Villamagua, Rafael Soler, André Saad, Raoni Melo, Bruno Prodocimo, Rafaela Prosdocini, Murilo Caliente e Augusto Locci.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, em especial ao Marcos Tavares e Mariano Viveiros.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento dos briquetes durante a queima, considerando a possibilidade de se aprimorar o índice de combustão de briquetes de biomassa (aqui denominado ICOMa) com o uso de um aplicativo de computador, de forma que esta nova proposta fosse mais sensível às variações dos dados que o ICOM (já existente na literatura), bem como determinar sua taxa de perda de massa em função do tempo de queima. Com esta nova proposta, também era esperado que se percebesse uma correlação entre o ICOMa e o poder calorífico superior da biomassa ensaiada, possibilitando estimar esta grandeza, ainda que de forma aproximada, sem o uso de uma bomba calorimétrica. A fabricação do dispositivo para obtenção do ICOMa foi baseada em trabalhos prévios obtidos na literatura, usando uma balança com porta de comunicação em protocolo RS 232, um termopar tipo K para medição da temperatura e um dispositivo para aquisição automática dos dados, feita por um aplicativo computacional também desenvolvido neste trabalho. Os briquetes usados nos ensaios foram de casca de algodão, toco de eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar e madeira de pinus, e foram produzidos especificamente para a determinação do ICOMa. O aplicativo atendeu às necessidades do ensaio para obtenção das variáveis relacionadas aos índices de combustão. O ICOMa foi mais sensível que o ICOM na observação da relação entre consumo de massa e geração de calor, e permitiu observar diferenças estatisticamente significativas entre materiais com diferentes curvas de temperatura, diferentemente do ICOM. O maior ICOMa foi de 0,97 e o menor de 0,75 $\text{K} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$, enquanto os ICOM foram de 0,55 e 0,43, respectivamente. A maior correlação de Pearson observada para o ICOMa deu-se com o tempo até se atingir a temperatura máxima. O ICOMa não apresentou correlação com o poder calorífico superior do material e o ICOM não apresentou correlação com nenhuma das variáveis observadas.

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

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the behavior of briquettes during burning, considering the possibility of improving the combustion index of biomass briquettes (here called ICOMa) using a software, so that this new proposal to be more sensitive to data variations than ICOM (already existing in the literature), as well as to determine its mass loss rate as a function of burning time. It was also expected with this new proposal, that a correlation between the ICOMa and the higher heating value of the tested biomass could be perceived, making it possible to estimate this magnitude, albeit approximately, without the use of a bomb calorimeter. The manufacture of the device for obtaining the ICOMa was based on previous work obtained in the literature, using a RS 232 communication port scale, a type K thermocouple for temperature measurement, and a device for automatic data acquisition by a computational application, this one developed in this work. The briquettes used in the tests were cotton bark, eucalyptus stump, sugarcane bagasse, and pinewood, and produced specially for the determination of ICOMa. The computational application met the needs of the test to obtain the variables related to the combustion indexes. The ICOMa was more sensitive than the ICOM in observing the relationship between the mass consumption and heat generation, and show a statistical difference between different temperature curves of the materials, unlike the ICOM. The biggest ICOMa found was 0.97 K.h.g^{-1} , and the smallest was 0.75 K.h.g^{-1} , while the ICOM index was 0.55 and 0.43, respectively. The higher Pearson correlation observed happened between ICOMa and the time until reaching the maximum temperature. The ICOMa did not correlate to the higher heating value, and the ICOM did not correlate to any of the tested variables.

Keywords: Data Acquisition. Biomass. Higher Heating Value. Burning rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dimensões (mm) gerais do queimador	32
Figura 2 - Queimador.....	32
Figura 3 - Isolamento térmico e queimador	33
Figura 4 - Estrutura física do dispositivo de medição	33
Figura 5 - Dimensões (mm) das partes do tubo e isolamento térmico	34
Figura 6 - Termopar, dispositivo de aquisição de dados e balança.....	35
Figura 7 - Painel do programa e seus respectivos campos de entrada e saída de dados	37
Figura 8 - Bloco de controle e discriminação dos itens	38
Figura 9 - Itens gráficos e dados coletados na tela principal	39
Figura 10 - Agitador eletromagnético	40
Figura 11 - Balança determinadora de umidade.....	41
Figura 12 - Molde de aço inoxidável para prensagem das biomassas	42
Figura 13 - Prensa hidráulica.....	42
Figura 14 - Briquetes	43
Figura 15 - Disposição dos briquetes no queimador e recipiente de álcool.....	45
Figura 16 - Queima da biomassa para obtenção do ICOM e ICOMa.....	45
Figura 17 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de casca de algodão.....	48
Figura 18 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar	49
Figura 19 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de madeira de toco de eucalipto.....	50
Figura 20 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de madeira de pinus	51
Figura 21 - Curvas de queima da biomassa de casca de algodão	53
Figura 22 - Curvas de queima da biomassa de cana-de-açúcar	53
Figura 23 - Curvas de queima da biomassa de madeira de toco de eucalipto	54

Figura 24 -	Curvas de queima da biomassa de madeira de pinus	54
Figura 25 -	Curvas de temperatura com diferentes áreas.....	56
Figura 26 -	Matriz gráfica de correlação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica das biomassas antes da briquetagem	47
Tabela 2 - Composição química imediata e poder calorífico superior	52
Tabela 3 - Médias de ICOM e ICOMa	55
Tabela 4 - Densidades, porosidades e taxas de queima.....	56
Tabela 5 - Matriz de correlação de Pearson e valores p	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Bioenergia	21
2.2	Produção de briquetes e suas propriedades físicas e químicas	22
2.2.1	Densidade de briquetes.....	25
2.2.2	Umidade na biomassa vegetal	26
2.2.3	Poder calorífico.....	27
2.3	LabVIEW	28
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1	Construção do dispositivo e determinação do ICOM e ICOMa	31
3.1.1	Programação no Labview	35
3.1.2	Programa Labview.....	37
3.2	Ensaio laboratorial dos briquetes	39
3.2.1	Caracterização do material e delineamento experimental	39
3.2.2	O processo de briquetagem	40
3.2.3	Determinação das densidades e porosidade.....	43
3.2.4	Determinação do ICOM e ICOMa.....	44
3.2.5	Análise estatística.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Propriedades físicas e químicas dos briquetes	47
4.2	Índices de combustão (ICOM e ICOMa).....	55
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A conciliação entre a preservação do meio ambiente e a busca pelo aumento na geração de energia são um desafio tecnológico a ser superado, já que aquelas energias geradas por combustíveis fósseis são as maiores emissoras de CO₂, considerado, atualmente, o principal responsável pelos problemas ambientais (WUEBBLES; JAIN; WATTS, 2002). Independentemente das tratativas acerca do problema, o planeta demandará mais energia no futuro (KANNAN; VAKEESAN, 2016) e aqueles que almejam o desenvolvimento precisarão estar alinhados com as decisões globais.

A biomassa é o recurso originado da matéria orgânica de animais ou vegetais, que pode ser usada como fonte de geração de energia (BENEDETTI et al., 2006). A renovação ocorre através do reuso, pela própria natureza, do gás carbônico alocado durante o crescimento da biomassa e liberado na queima ou decomposição desta matéria (GALBIATI; GALLO; LAVANHOLI, 2010).

Várias projeções do uso de energias alternativas são estabelecidas para atender a diferentes metas de segurança energética, incluindo metas de uso de resíduos de culturas agrícolas (BENTSEN; NILSSON; LARSEN, 2018), sendo o uso da biomassa uma das medidas propostas para se alcançar tais feitos. Apesar de o Brasil ter 46% de sua matriz energética advinda de energias renováveis, o que é uma grande vantagem frente ao restante do planeta (13%) (EPE, 2019), a busca por novas formas e pelo aprimoramento do uso das já existentes não podem cessar (EMBRAPA, 2011).

Apesar de o território brasileiro ter a capacidade de incorporar novas áreas agrícolas para a produção de bioenergia sem que esta venha a competir com a produção de alimentos (BORGES et al., 2016), o reaproveitamento energético da biomassa residual de vegetais seria uma forma ainda mais interessante de se reduzir a pressão sobre os recursos naturais diretamente explorados como fonte de combustíveis renováveis (SILVA, 2017).

No aproveitamento dos resíduos agrícolas e florestais, a briquetagem, caracterizada pela densificação e redução da umidade da matéria prima, aumenta a concentração volumétrica de energia e reduz seu custo logístico (GENDEK et al., 2018).

O briquete é um substituto direto da lenha em muitas aplicações, no uso residencial, em indústrias e estabelecimentos comerciais, como olarias, cerâmicas, padarias,

pizzarias, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis, de cimento, dentre outros (SILVA; CARNEIRO; LOPES, 2017).

Na literatura, os estudos existentes mostram as possibilidades de uso e características físico-químicas dos briquetes feitos de diferentes materiais, como palha e farelo de arroz (YANK; NGADI; KOK, 2016), (CHOU et al., 2009), casca de café (AMAYA et al., 2007) e resíduos de milho (KALIYAN; MOREY, 2010).

O estudo das propriedades de briquetes ajuda na determinação de características que podem definir a viabilidade de uso deste produto. Quirino & Brito (1991) propuseram um índice para caracterização dos briquetes, o ICOM (índice de combustão), que considera o tempo em que os briquetes permanecem queimando a uma temperatura superior à 150 °C (tomando a temperatura a uma determinada distância da base da chama), a temperatura máxima atingida e a massa de briquete consumida durante sua a queima.

Neste experimento, a aquisição dos dados era feita em períodos regulares, pela observação e registro manual das leituras de instrumentos de medição que mostravam tais grandezas. A automação desse processo pode torná-lo mais preciso por permitir uma nova forma de cálculo do índice. Uma plataforma de programação utilizada para este tipo de processo é o LabVlew, que possui funcionalidades para a aquisição de dados e a conversão de sinais analógicos em representações digitais, permitindo o processamento destes por um microcomputador (MORRIS; LANGARI, 2012).

O estudo das propriedades de briquetes é uma forma de caracterizar este material e, assim, permitir um melhor entendimento de seu potencial energético, portanto, este trabalho teve como objetivo aprimorar o índice de combustão de briquetes, usando um aplicativo de computador para auxiliar na aquisição dos dados e avaliar o comportamento dos briquetes durante a queima.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioenergia

O uso da biomassa para obtenção de energia é apontado como uma das formas de se atenuar os problemas ambientais contemporâneos em busca de um sistema sustentável, que promova um ciclo do CO₂ (dióxido de carbono).

A emissão de CO₂ em nível global foi de 36153×10^6 toneladas de CO₂ em 2017, com aumento de 17% em período de 10 anos. O Brasil, por ser muito populoso, figura na 13^a posição em números absolutos, com uma taxa de 476×10^6 toneladas de CO₂, mas cai para a 68^a quando em valores relativos à população (CO₂ EMISSIONS GLOBAL CARBON ATLAS, 2019).

A produção vegetal primária anual mundial estimada é de 120×10^9 toneladas de biomassa seca (a massa dos vegetais, descontada a água presente nestes) (BROADMEADOW, 2003 apud GUO; SONG; BUHAIN, 2015).

O potencial de fornecimento de bioenergia da área total global, excluindo as terras cultiváveis, a infraestrutura, a floresta nativa e o deserto, é estimado em $1,9 \times 10^{20}$ J ano⁻¹ (HABERL et al., 2013), o que corresponde a 32,9% do fornecimento de energia global em 2016, que foi de $5,8 \times 10^{20}$ J (IEA, 2019).

Da energia total fornecida em 2016, a bioenergia foi responsável por $5,65 \times 10^{19}$ J (IEA, 2019), que corresponde a 9,8% do total global.

No Brasil os biocombustíveis fornecem $3,7 \times 10^{18}$ J e correspondem a 31% do total nacional (EPE, 2019).

O Brasil é um país de produção agrícola intensa e, portanto, a geração de resíduos no meio é igualmente relevante, de forma que um aproveitamento desses resíduos pode vir a ser uma fonte de energia importante.

A biomassa vegetal tem ampla abrangência de materiais, pois engloba todos os organismos formados através do processo de fotossíntese, bem como os produzidos pela utilização destes, como resíduos de matéria orgânica agrícola e florestal e aqueles contidos nos resíduos industriais, domésticos e comerciais (BRAND, 2010 apud NONES et al., 2017).

A biomassa vegetal figura entre as maiores fontes de energia no planeta, ficando atrás apenas do carvão e do petróleo (TUMULURU et al., 2011).

Os resíduos de produção, florestais e agrícolas, que são aqueles gerados no processo de colheita, no beneficiamento de madeiras em serrarias, nas sobras de marcenarias, na fabricação de painéis de madeira reconstituída, na produção de celulose, no beneficiamento do arroz e do milho, por exemplo, podem se tornar um desperdício de produção se não forem aproveitados como fonte de renda, já que são mal manejados em muitos casos, chegando a causar problemas ambientais (NONES et al., 2017).

Uma das limitações para o uso da biomassa de resíduos lignocelulósicos como combustível é sua baixa densidade em seu estado natural (TUMULURU et al., 2011), mas, em geral, se processados corretamente, são ótimas opções para obtenção de biocombustíveis sólidos com alta qualidade, e existem com alta disponibilidade no Brasil (NAKASHIMA et al., 2017).

Os resíduos são utilizados em todo o mundo como fonte de energia, principalmente em países subdesenvolvidos, para o cozimento de alimentos, onde estima-se que aproximadamente 3 bilhões de pessoas se sirvam desta prática (WHO, 2018)

Estes resíduos, quando queimados em seu estado natural, lançam na atmosfera muita matéria particulada, além de terem baixa eficiência térmica e gerarem muitos resíduos de cinzas não queimadas completamente (GROVER; MISHRA, 1996).

A maior parte das partículas geradas na queima da biomassa tem material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm (PM_{2.5}) (NIU et al., 2017), que é um poluente que tem muitos efeitos adversos ao meio ambiente e, principalmente, à saúde humana (LI et al., 2014).

As emissões de carbono orgânico e carbono elementar são mais altas para combustíveis crus em relação aos briquetes porque as altas densidades de briquetes podem diminuir a taxa de queima e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de combustão, que diminui eficientemente a produção destes elementos poluentes (SUN et al., 2019).

2.2 Produção de briquetes e suas propriedades físicas e químicas

Uma forma de melhorar os problemas relacionados ao uso da biomassa na sua densidade natural é promover a sua compactação por meio da produção de briquetes (SETTE JR et al., 2016).

Um trabalho realizado na China sugere que a briquetagem pode reduzir eficientemente as taxas de emissão de PM_{2.5} e seus componentes, chegando a uma redução de 53% das emissões supondo uma substituição de todos os combustíveis brutos, onde os briquetes de palhas de milho e de trigo demonstraram mais de 80% de eficiência de redução de emissões de carbono orgânico e elementar em comparação com a queima de palha crua. Entretanto, briquetes de galhos de madeira não conseguiram reduzir as taxas de emissão de PM_{2.5} e alguns outros componentes (SUN et al., 2019).

No Brasil são produzidos cerca de 1,2 milhões de toneladas de briquetes anualmente. Dessas, 930 mil toneladas são de madeira e 272 mil toneladas são provenientes de resíduos agrícolas (como o bagaço da cana-de-açúcar, palha e casca de arroz, resíduos de caroço de algodão e açaí) (BIOMASSABR, 2013). Ainda segundo dados desta mesma fonte, a taxa de crescimento da demanda no momento da pesquisa era de 4,4% ao ano.

O processo de briquetagem consiste na diminuição do volume, e consequente aumento da densidade, de uma biomassa particulada.

Este processo se dá pela compactação da biomassa que é prensada em espaço confinado, sofrendo pressões que variam conforme o projeto da briquetadora e características do material a ser prensado. Como exemplo, existem fabricantes no mercado que anunciam uma pressão de 1200 kgf cm⁻² (BIOMAX, 2019), bem como diversos trabalhos que utilizaram tal valor na condução de experimentos similares (CHRISOSTOMO, 2011; SILVA et al., 2015; ALÓ et al., 2017).

A alta pressão exercida na biomassa pelo processo de prensagem no momento da produção do briquete garante a aderência de suas partículas e confere ao material características como a resistência ao esboroamento (menor friabilidade) no transporte, na estocagem e até mesmo no momento da queima (RAJU et al., 2014), entretanto, em alguns casos, é mais viável o uso de ligantes para garantir uma melhor aglutinação e, consequentemente, melhor eficiência em todo o processo de produção (RAHAMAN; SALAM, 2017).

A composição química da biomassa, que inclui celulose, hemiceluloses, proteínas, amido, lignina, fibra bruta, gordura e cinzas, também afeta o processo de densificação (TUMULURU et al., 2011).

Historicamente, a tecnologia de briquetagem de biomassa foi desenvolvida em duas direções distintas. A Europa e os Estados Unidos buscaram e aperfeiçoaram a

prensa de pistão, enquanto o Japão inventou e desenvolveu de forma independente a tecnologia de prensa de fuso. Embora ambas as tecnologias tenham seus méritos e desvantagens, é universalmente aceito que os briquetes prensados em prensas de fuso são muito superiores aos briquetes sólidos prensados por pistão em termos de capacidade de armazenamento e de combustibilidade (GROVER; MISHRA, 1996).

Uma característica que diferencia os briquetes das duas principais técnicas de produção é o furo concêntrico existente nos de fuso e não existente nos de pistão, que garantem maior área específica e, conseqüentemente, melhor queima (GROVER; MISHRA, 1996).

Os ligantes utilizados também são variados, sendo que cada tipo termina por imprimir características ao produto final que é o briquete, que podem resultar em mudanças na adesão das partículas e, portanto, na resistência ao esboroamento, na resistência a compressão, tempo de queima, no poder calorífico e, além disso, podem acrescentar ou não um custo na produção, já que a adição de ligante pode ser recompensada pelo uso de menores pressões de compactação e menor desgaste dos equipamentos usados na briquetagem (MUAZU; STEGEMANN, 2017).

A umidade da biomassa tem um papel fundamental na produção de briquete, pois atua como ligante, junto da lignina, além de facilitar a interação intermolecular das partículas, sendo, assim, um importante fator a ser considerado no processo de briquetagem (STELTE et al., 2011).

O processo de briquetagem também contribui para a diminuição dos custos de transporte, que é o principal custo em sua produção (ALVARENGA et al., 2016).

Em se tratando de resíduos lignocelulósicos, a briquetagem possibilita uma concentração de energia equivalente a cinco vezes àquela contida no mesmo volume de resíduos soltos (QUIRINO, 1991). Silva et al. (2015), entretanto, encontraram valores de compactação de até catorze vezes para palha de cana-de-açúcar.,

Os briquetes podem ter diversas formas, mas o formato cilíndrico, que distribui uniformemente a concentração de forças no momento da compressão e não deixa arestas que facilitariam o esboroamento, é o mais utilizado tanto em processos industriais com o em escalas laboratoriais.

Há várias características importantes a serem consideradas para garantir a possibilidade do uso da biomassa como matéria prima para produção do briquete.

Uma característica usualmente observada nos processos de produção do briquete é a estabilidade dimensional, que permite avaliar indiretamente sua resistência

mecânica por meio do registro de suas dimensões por um certo período após sua fabricação. Briquetes com maior estabilidade dimensional apresentam, geralmente, maior resistência mecânica (SILVA et al., 2015).

O teor de cinzas é muito relevante, já que sua alta concentração promove a escorificação das caldeiras, que é a deposição de material sólido em suas superfícies, causada pelo alto teor de materiais alcalinos (em sua maioria o potássio) presente nas cinzas, que condensam nas tubulações da caldeira, diminuindo também a temperatura de sinterização da cinza e promovendo seu acúmulo nas superfícies do sistema (GROVER; MISHRA, 1996).

Além disso, uma boa biomassa para briquetagem também deve ter grãos regulares que confirmem fluidez para facilitar o escoamento da biomassa em silos ou armazenadores diversos, ter baixa umidade (geralmente entre 10 e 15%) para garantir uma boa queima sem perda de características aglutinantes (GROVER; MISHRA, 1996).

2.2.1 Densidade de briquetes

Segundo YAMAJI et al (2013), a densidade é muito importante no sistema de aproveitamento da madeira e seus resíduos na produção de energia, uma vez que, quanto maior a densidade, maior a energia por unidade de massa do material e, conseqüentemente, melhor o aproveitamento de custos no seu transporte e armazenamento.

A massa específica, ou densidade, é a razão entre massa e volume de um corpo, e sua unidade no SI é o kg.m^{-3} , mas é comum encontrar outras unidades em artigos científicos específicos e na literatura em geral. Normalmente, a quantidade de energia presente na biomassa é dada em função de sua massa. Isso significa que um material com maior densidade terá maior massa e, portanto, energia por unidade de volume.

Sobre a densidade da madeira, Englerth (1966) disse se tratar de um termo que seria praticamente sinônimo de sua qualidade quando se pensa em questões estruturais.

Não seria exagero colocar esta propriedade entre as mais importantes quando se fala em biomassas em geral, também, para fins energéticos, já que sabemos que o poder calorífico é dado em função da massa do material e varia pouco entre as diferentes biomassas vegetais, mas que a densidade tem grande variação, portanto, a densidade é uma variável que exerce grande influência na quantidade de energia na

biomassa vegetal, ou seja, ela pode ser considerada o principal fator relacionado à concentração de energia no material.

Apesar de o adensamento ser importante, segundo Furtado et al. (2010), em materiais com maior conteúdo de extrativos voláteis, o aumento da pressão na produção de briquetes pode reduzir seu poder calorífico, uma vez que acabam por liberar estes voláteis para o meio em razão do aumento da pressão e temperatura e consequente diminuição dos espaços vazios no corpo do briquete.

Desta forma, apesar de serem raros os casos em que se observa o extrudamento de extrativos pela simples compressão do material, os estudos levam a crer que, na produção de briquetes, há uma pressão ótima de trabalho e, portanto, uma densidade ótima a ser considerada em função da quantidade de extrativos voláteis.

2.2.2 Umidade na biomassa vegetal

Por ser um material orgânico complexo e não homogêneo, a biomassa vegetal é altamente higroscópica, ou seja, absorve muita água, de forma que sua umidade pode ser alterada com a variação da umidade relativa do ar, por exemplo (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Existem dois tipos de água presentes nas biomassas, sendo a primeira a água de capilaridade (água livre) localizada nos vasos, meatos, canais e lúmen das células, água esta que se desprende facilmente. Esta água é facilmente retirada da biomassa e, quando isso acontece, esta chegará à umidade denominada de ponto de saturação das fibras (PSF) (SHMULSKY; JONES, 2011). Normalmente, o ponto de saturação das fibras para a madeira está em uma faixa que varia entre 28% e 30% de umidade em base seca, dependendo da espécie (MENEZES et al., 2014). Para outras biomassas existem outros PSF, e são pouco explorados na literatura.

O segundo tipo de água presente na biomassa vegetal é a água de adesão, ou higroscópica, que é a água presa, ligada às fibras do material. Diferentemente da água de capilaridade, esta não é facilmente removida dos tecidos, sendo necessária a aplicação de energia (aplicação de calor em estufa ou similar) na secagem (SHMULSKY; JONES, 2011).

A umidade pode ser dada em base seca ou base úmida, sendo que nesta a relação é dada pela massa de água na amostra pela massa da biomassa úmida, enquanto naquela é dada pela massa de água na amostra pela massa da biomassa seca. Esta

última pode gerar valores acima de 100%, já que pode haver mais massa de água que massa de madeira, e é a mais presente na literatura.

No caso dos briquetes, a umidade afeta os seus parâmetros físicos, como durabilidade, densidade e poder calorífico (TARASOV; SHAHI; LEITCH, 2013).

A relação entre o poder calorífico e a umidade é bastante intuitiva, pois sabe-se que, independentemente de qual seja o material, os mais úmidos têm mais dificuldade para entrar em combustão. Como exemplos práticos desta propriedade, Souza (2012) relatou ganhos energéticos de aproximadamente 100%, indo de aproximadamente 6,3 MJ kg⁻¹ para 12,5 MJ kg⁻¹, para costaneiras de *Pinus taeda*, quando sua umidade foi de 138% para 40,8%. Outro exemplo prático, feito por Sturion (1990), descreveu o incremento energético de 130%, indo de aproximadamente 5,4 MJ kg⁻¹ para 12,5 MJ kg⁻¹, nas umidades de 108% e 61%, respectivamente, para a madeira de bracatinga.

É consensual que a biomassa se comportará de forma parecida para as diversas espécies de árvores e pode-se utilizar uma equação comum a todas elas para calcular, a partir do poder calorífico superior, a energia útil liberada na queima, que é aquela que desconsidera tanto a energia liberada necessária para evaporar a água de formação quanto as de capilaridade e adesão.

Estes autores partem do pensamento de que a energia usada para evaporação está relacionada à quantidade de água e não às propriedades da biomassa e, portanto, se poderia admitir uma equação geral para determinação do poder calorífico útil (GUERRA et al., 2019).

2.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico do material é uma propriedade importante para os cálculos de projetos térmicos e pode ser descrito em duas bases, sendo o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico superior é relativo ao calor liberado pela combustão, considerando aquele utilizado para vaporizar a água contida na amostra originalmente, bem como a água gerada na combustão pela combinação das moléculas de hidrogênio e oxigênio, ambas, em sua forma condensada, enquanto o poder calorífico inferior corresponde ao calor liberado, descontando aquele necessário para vaporização desta água de formação (SHENG; AZEVEDO, 2005).

Apesar de PCI e PCS serem as bases mais conhecidas e utilizadas na literatura por fornecerem uma informação mais substancial da biomassa, o poder calorífico útil (PCU) é bastante utilizado no meio comercial, e corresponde ao poder calorífico despreendido do material em combustão, descontada a energia necessária para evaporar tanto a água de formação quanto as águas de adesão e capilaridade, presentes em todas as biomassas comerciais, já que não é viável, e muitas vezes possível, secar totalmente a biomassa para queimá-la em grande escala (GUERRA et al., 2019).

O valor de aquecimento de um combustível de biomassa pode ser determinado experimentalmente por meio de um calorímetro adiabático de bomba, que mede a mudança de entalpia entre reagentes e produtos (SHENG; AZEVEDO, 2005). Demirbaş (1997) relata ainda que, para a biomassa, é possível utilizar métodos alternativos ao experimento com o calorímetro para obter seu poder calorífico, uma vez que este é função do material volátil e carbono fixo contidos na matéria, grandezas que podem ser obtidas de forma simples em laboratório. De fato o poder calorífico é a característica mais importante dos combustíveis de biomassa, e depende da composição química, tamanho das partículas, temperatura de processamento e do pré tratamento, se houver (TUMULURU et al., 2011).

Vários componentes da madeira influenciam em seu poder calorífico. Madeiras com maior teor em lignina, por exemplo, resultam em carvão com maior poder calorífico (SATANOKA, 1963 apud QUIRINO; BRITO, 1991). Segundo Protásio et al. (2011), o poder calorífico tem alta correlação linear com os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio mais cinzas, sendo que estes últimos (O + CZ) contribuem para a diminuição do PCS, enquanto aqueles (C e H) contribuem para seu aumento. Desta forma, é interessante que, para o uso da madeira como combustível, esta tenha baixo teor de cinzas (GARCIA et al., 2016).

2.3 LabVIEW

Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) é um ambiente de programação gráfica baseado no conceito de programação de fluxo de dados e tem sido amplamente utilizada para aquisição de dados e controle de instrumentos. Existem três componentes importantes envolvidos em aplicações de teste e medição, como a aquisição de dados, análise de dados e a visualização de dados (CHUGAN, 1998 apud GANI; SALAMI, 2002).

No LabVIEW usa-se ícones e linhas em vez de linguagem em texto para criar aplicativos, o que facilita sua aplicação no meio científico, técnico e de engenharia (CHOUDER et al., 2013).

Nas aplicações laboratoriais, todos os conceitos de engenharia estão relacionados à quantificação de grandezas físicas como temperatura, velocidade, posição, grandezas elétricas, força, de forma que a manipulação desses dados sejam a mais prática e racional possível, característica base deste software de programação, que se comunica facilmente com sistemas de aquisição de dados e pode dar uma aproximação visual entre o usuário e o sistema, facilitando o processamento dos dados (ERTUGRUL, 2000).

O Sistema modular do LabVIEW permite ainda a redução do script de programação usando as estruturas de sub-virtual instruments, simplificando linhas de código em outras ferramentas de programação (ERTUGRUL, 2000), e a aquisição de dados pode envolver vários canais de entrada analógica, que servem para a maioria dos sensores que fornecem tensão como sinal de saída (FERRAND, 2015).

As funções na biblioteca do LabVIEW são chamadas de instrumentos virtuais (ou VI, do inglês Virtual Instrument). Estes VI's permitem usar algoritmos clássicos de processamento digital, sem que seja necessário escrever linhas de código, usando um sistema de diagrama de blocos e um conjunto de VI's (GANI; SALAMI, 2002).

O programa é usado nas mais diversas finalidades, desde o estudo de automação residencial como na reportada por Hamed (2012) ou até mesmo na área da saúde (ELLIS; JONES, 1991; NALINI, 2018).

O LabVIEW faz o processo de integração de hardware mais prático, usando um sistema simples e consistente, que repete o padrão de inicialização, configuração leitura e escrita para uma grande variedade de dispositivos e, na maioria das vezes, retorna um formato de dados compatível com a interpretação do software, reduzindo a necessidade de adaptação para comunicação entre os mais diversos protocolos em linguagem de baixo nível (HAMED, 2012).

Um diferencial do LabVIEW em comparação com os outros programas é sua linguagem "G", altamente modular que possui uma variedade de ferramentas de medição e controle em um único pacote de aplicativos (SHARIFF; RAHIM; HEW, 2015) em uma ampla biblioteca de funções matemáticas e estatísticas. A programação gráfica é flexível e reutilizável para outros programas, salvando sub-rotinas em bibliotecas que podem ser manipuladas novamente sem necessidade de modificações em outros

programas, o que reduz significativamente o tempo de desenvolvimento e facilita a modificação do programa pelo usuário (KALKMAN, 1995).

3 MATERIAL E MÉTODOS

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

Este tópico contempla o desenvolvimento e aprimoramento do dispositivo para determinação do ICOMa, bem como o processo de produção e caracterização dos briquetes utilizados nos ensaios

Foram produzidos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar, madeira de pinus, casca de algodão, e tocos de eucalipto por serem biomassas com diferentes PCS's.

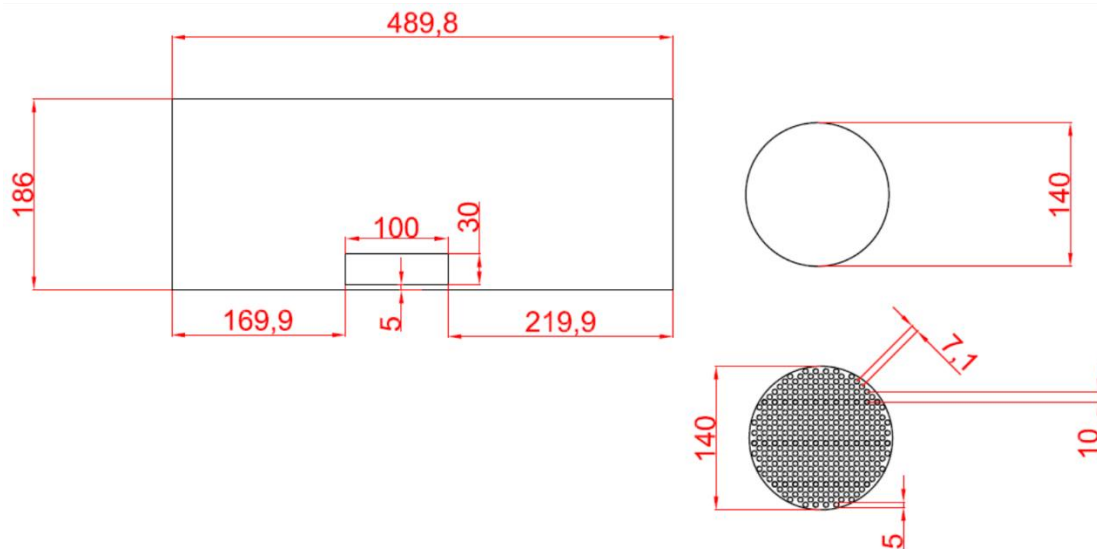
3.1 Construção do dispositivo e determinação do ICOM e ICOMa

Com base no dispositivo desenvolvido para determinação do ICOM por Quirino e Brito (1991), foi construído um aparelho para queima e monitoramento da temperatura e consumo de massa dos briquetes. A estrutura do dispositivo foi construída em chapa de aço carbono SAE1020 e é composta por um queimador, um tubo para diminuição do deslocamento de ar, e uma base de isolamento térmico.

O queimador consiste de um recipiente cilíndrico com dois compartimentos separados por uma grade, também em aço, com malha de cinco milímetros de diâmetro por furo e 7,1 mm de espaçamento entre centros dos furos.

As dimensões da chapa externa antes da calandragem, a peneira e o fundo do queimador estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Dimensões (mm) gerais do queimador



Desenho: Emanuel R. Spadim

Na parte superior, sobre a peneira que dista 90 mm do fundo do queimador, ficam acomodados os briquetes a serem analisados e, na parte inferior, um recipiente com o combustível inicial, usado para começar a combustão. O queimador já montado pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Queimador

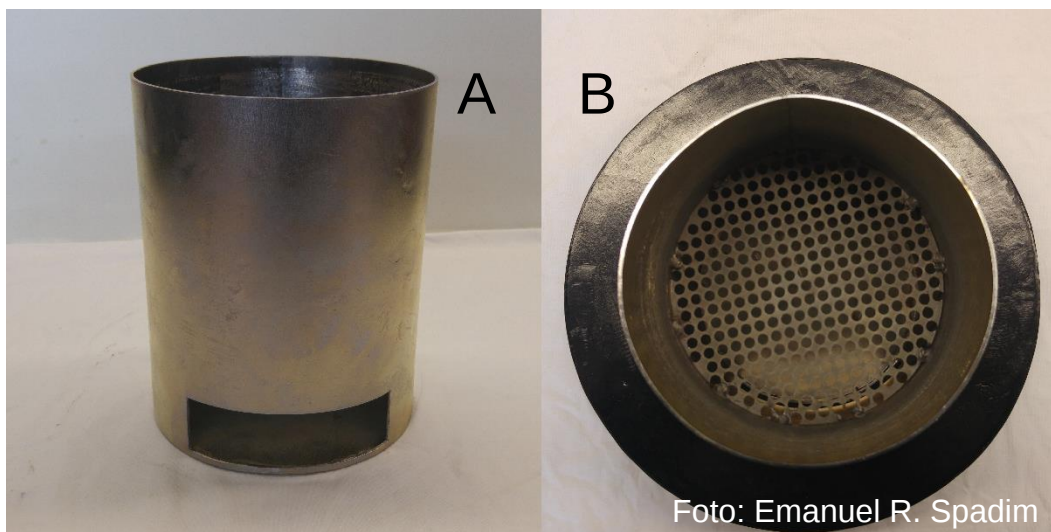


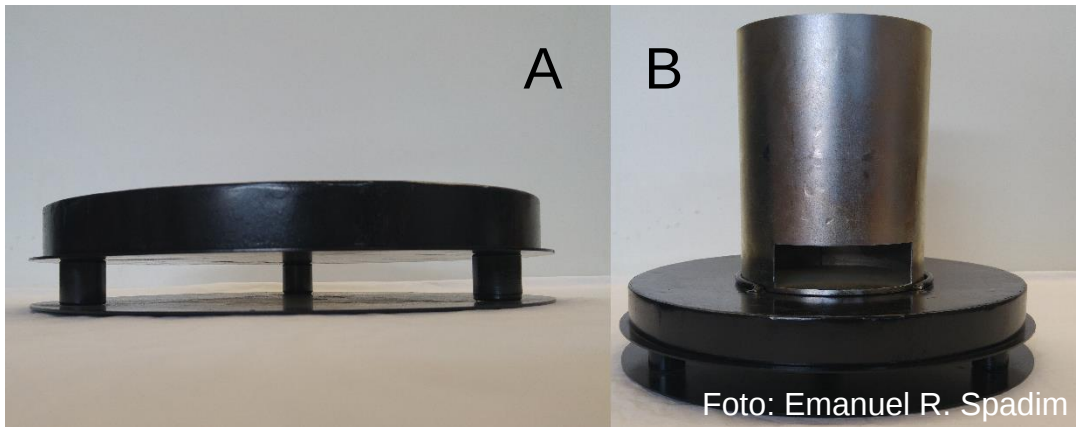
Foto: Emanuel R. Spadim

A: vista frontal e B: vista superior

A estrutura do queimador foi montada sobre uma base de isolamento térmico, conforme ilustra a Figura 3. A primeira isolação é feita com lã de rocha, já uma segunda isolação foi feita deixando-se um espaço entre a base de lã de rocha e o fundo

do isolamento, este preso por espaçadores, a fim de garantir que não seja transmitido calor à parte inferior do conjunto.

Figura 3 - Isolamento térmico e queimador



A: Isolação térmica B: Queimador sobre isolação térmica

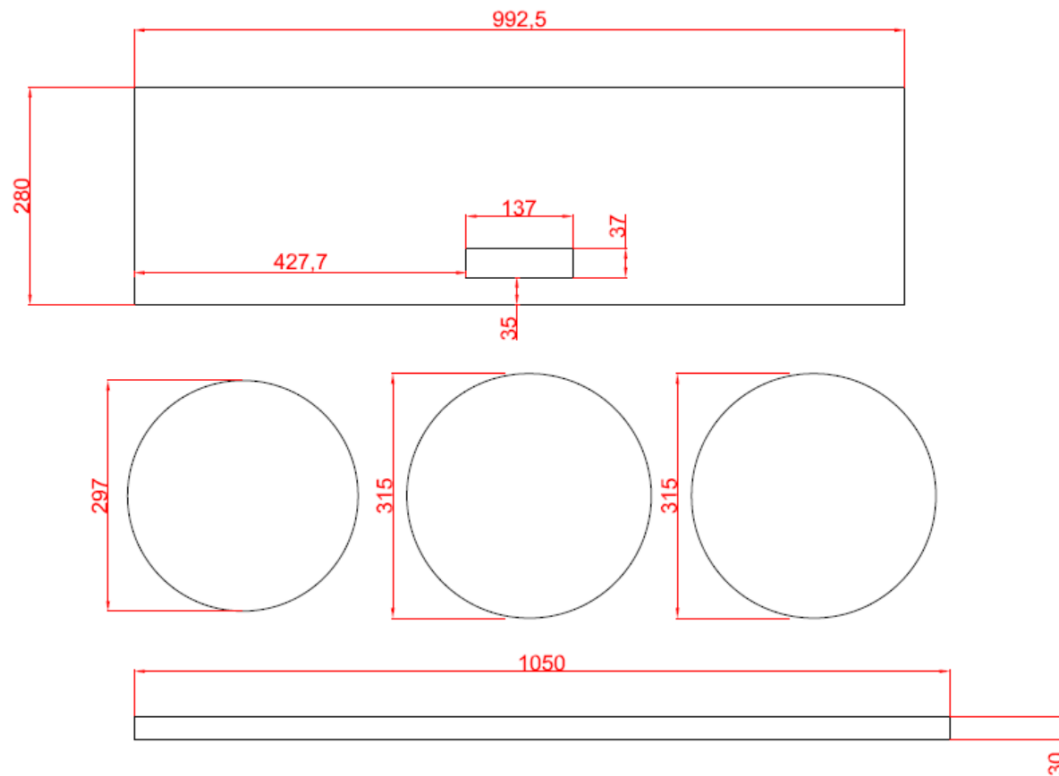
A fim de evitar influência do deslocamento de ar externo na queima dos briquetes, este recipiente fica acomodado em tubo de maior diâmetro (cilindro preto) apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura física do dispositivo de medição



As dimensões da chapa do tubo antes da calandragem e das partes usadas para construção do isolamento térmico estão descritas na Figura 5.

Figura 5 - Dimensões (mm) das partes do tubo e isolamento térmico



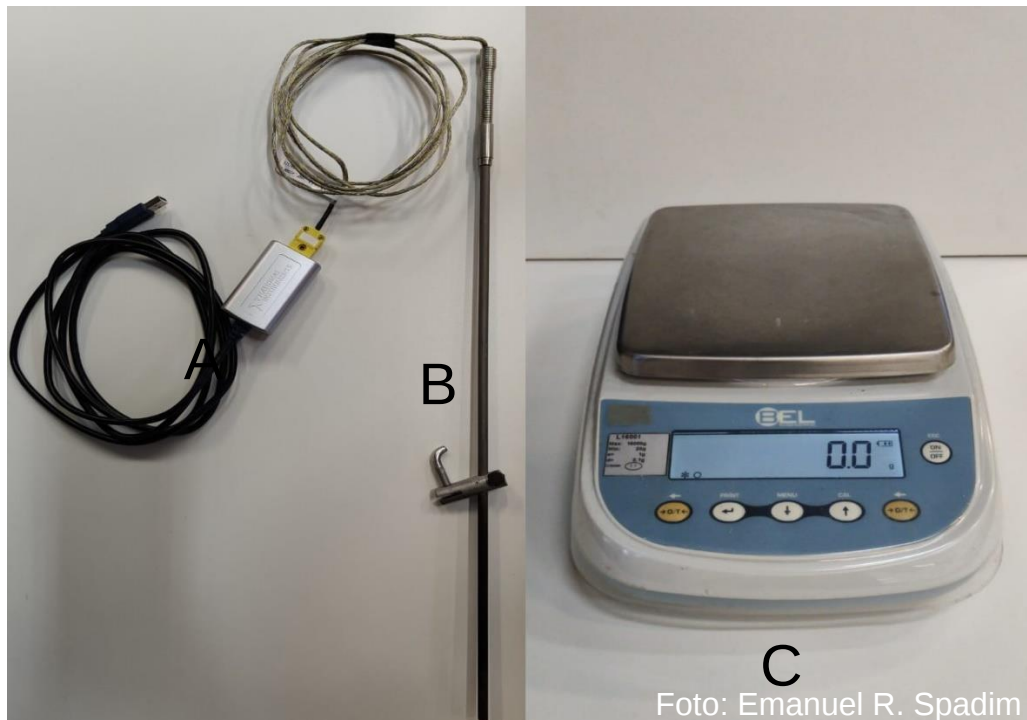
Desenho: Emanuel R. Spadim

Toda a estrutura do dispositivo foi instalada sobre uma balança de laboratório, da marca Bel, modelo L16001, com saída de sinais por protocolo RS232, para medição da perda de massa, através da comunicação com um computador.

Para medição da temperatura foi utilizado um termopar mineral tipo "k", da marca Salcas, com bainha de inox de 6 mm de diâmetro por 400 mm de comprimento, e um dispositivo de aquisição de dados, modelo NI USB-TC01 da marca National Instruments.

A balança, o dispositivo de aquisição de dados e o termopar são mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Termopar, dispositivo de aquisição de dados e balança.



A: Dispositivo de aquisição de dados B: Termopar C: Balança

3.1.1 Programação no Labview

Os dados gerados nas análises foram monitorados por um programa supervisorio desenvolvido em Linguagem G (Desenvolvedor LabVIEW), que fornece o índice de combustão, bem como os gráficos representativos do processo, instantaneamente, podendo também serem exportados para planilha eletrônica posteriormente.

Além da nova forma de determinação do índice, sugerida neste trabalho, o aplicativo calcula também o ICOM como proposto por Quirino & Brito (1991), que consistia em monitorar a temperatura e perda de massa de briquetes em combustão ao longo do tempo enquanto a temperatura permanecia acima de 150 °C, por um período máximo de 120 minutos, e aplicar a equação 3.1.

$$ICOM = \frac{A.B}{100.C} \quad (3.1)$$

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 da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150 °C, %.

A determinação do ICOM é baseada na ideia de que deve-se esperar que um bom briquete forneça as mais altas temperaturas durante o maior tempo e consumindo a menor quantidade de massa possível, conforme afirmado por Quirino & Brito (1991), portanto o índice será maior quanto maior forem o tempo de queima e as temperaturas registradas durante o ensaio, sendo, então, uma grandeza relacionada à quantidade de energia desprendida na queima.

Para determinação do ICOMa, a temperatura de queima foi monitorada e a coleta de dados iniciada quando a variação com relação à temperatura inicial chegava aos 150 °C, da mesma forma que acontecia na determinação original do ICOM. Este processo, por si só, elimina erros de perda de massa relativos ao álcool consumido na ignição, bem como o seu calor gerado, já que a coleta de dados inicia quando a massa de álcool já foi consumida.

Iniciada a coleta, a cada 15 segundos os dados de perda de massa e temperatura foram registrados, sendo estes usados para o ajuste de um modelo polinomial de quarta ordem pelo método dos mínimos quadrados, e aqueles usados para determinação da massa total consumida e taxa de queima.

O ICOMa foi determinado pela equação 3.2, pois a relação entre a integral da temperatura em função do tempo e o consumo de massa foi mais sensível às variações de temperatura obtidas no ensaio, pelo fato de a regressão gerada pelos dados de temperatura representarem melhor a liberação de energia dos briquetes quando comparado ao produto da temperatura máxima pelo tempo de queima, fazendo mais justas as comparações entre amostras.

Apesar de o ICOM ser adimensional, por usar as variáveis em unidades percentuais, a sua representação poderia ter unidade de medida igual à do ICOMa, da equação 3.2, já que os elementos usados para eliminar tais unidades de medida são, em

todos os casos, iguais (temperatura de 150 °C e o tempo de 120 minutos), comportando-se como constantes. Isso permite que as variações das grandezas sejam comparáveis entre amostras quando dentro do mesmo método.

$$ICOMa = \frac{1}{3600m} \int_a^b \Delta T(t) dt \quad (3.2)$$

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;

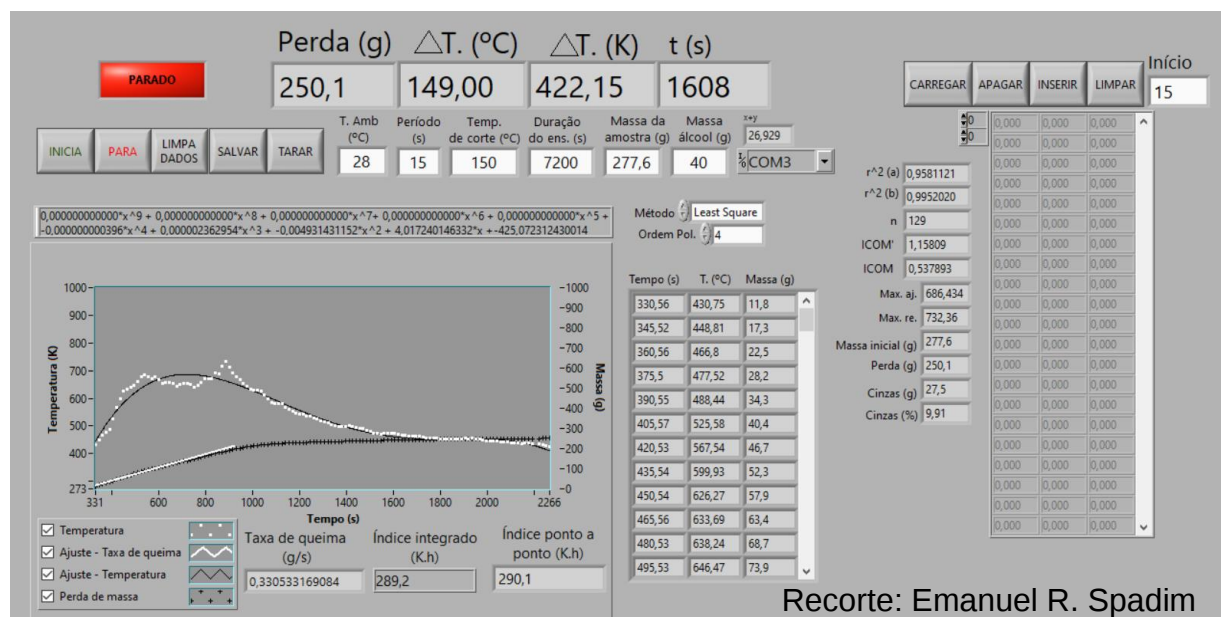
t – tempo de ensaio decorrido, s.

m – massa consumida acima de 150 °C, g.

3.1.2 Programa Labview

A Figura 7 traz uma visão geral do painel do programa desenvolvido neste trabalho para determinação do ICOMa.

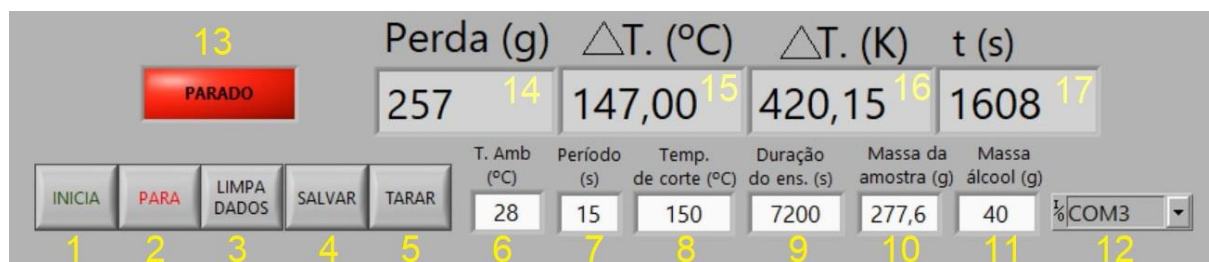
Figura 7 - Painel do programa e seus respectivos campos de entrada e saída de dados



Recorte: Emanuel R. Spadim

Os itens de controle, na parte superior do painel, estão discriminados na Figura 8 e explicados a seguir.

Figura 8 - Bloco de controle e discriminação dos itens



Recorte: Emanuel R. Spadim

1 – Inicia a observação para coleta dos dados; 2 – Para 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, suas legendas, representações matemáticas e dados coletados estão apresentados na Figura 9.

Figura 10 - Agitador eletromagnético



O material foi acondicionado em um recipiente de volume conhecido e pesado para a determinação da sua densidade aparente a 12% de umidade, antes da compactação, a fim de obter seu ganho de densidade após a compactação, bem como sua redução de volume.

Foram realizadas análises do poder calorífico superior das amostras seguindo metodologia da norma ABNT NBR 8633/84, que se baseia na liberação de calor da queima, em bomba calorimétrica, de uma amostra de massa conhecida.

Também, foram analisados o teor de cinzas (CZ) de acordo com a norma ASTM D1102-84 e materiais voláteis (MV) de acordo com a norma ASTM E872-82. O carbono fixo foi obtido pela diferença entre a massa total da matéria e o resultado das análises de cinzas e materiais voláteis, de acordo com a norma ASTM E870-82.

3.2.2 O processo de briquetagem

Depois de moídas as amostras, com o uso de uma balança determinadora de umidade, marca Bel, modelo ithermo 163L (Figura 11), a umidade das biomassas foi

ajustada para $12\% \pm 1\%$ em base seca, sendo esta a umidade mais utilizada na literatura para fabricação de briquetes, por fornecer as melhores características físicas e energéticas necessárias a um combustível sólido prensado (SILVA et al., 2015; GONÇALVES et al., 2013; EUFRADE JUNIOR et al., 2017).

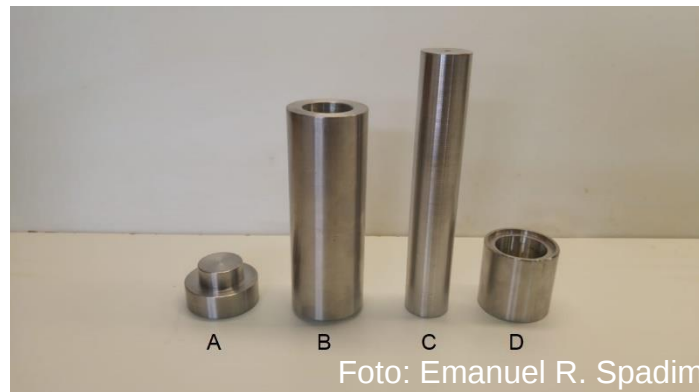
Figura 11 - Balança determinadora de umidade



O ajuste da umidade foi feito borrifando-se água na amostra e agitando-a em intervalos regulares durante o dia, fazendo seu uso para briquetagem 24 horas após a umidificação, para que esta umidade fosse distribuída de forma homogênea pela amostra. Nos casos em que foi necessário diminuir sua umidade, foi separada da totalidade do material uma quantidade necessária de amostra a ser seca e levada à estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, até a estabilização de seu peso, 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, fazendo-se o mesmo procedimento utilizado na umidificação.

Foi construído um molde de aço inoxidável para prensagem das biomassas e obtenção os briquetes, composto por uma base removível (A), o corpo do molde (B), a haste de compressão (C) e o suporte para remoção do briquete (D), conforme metodologia utilizada por Chrisostomo (2011), apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Molde de aço inoxidável para prensagem das biomassas



Os briquetes foram produzidos em escala laboratorial, usando uma prensa hidráulica de pistão, acionada por bomba hidropneumática, conforme Figura 13.

Figura 13 - Prensa hidráulica



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

Os materiais foram separados em porções de 20 g, colocados no molde e submetidos a uma força de 11550 kgf, que corresponde à força necessária para produzir a pressão desejada, para um diâmetro de briquete de 35 mm.

Os briquetes de casca de algodão (A), madeira de toco de eucalipto (B), bagaço de cana de açúcar (C) e madeira de pinus (D) são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Briquetes

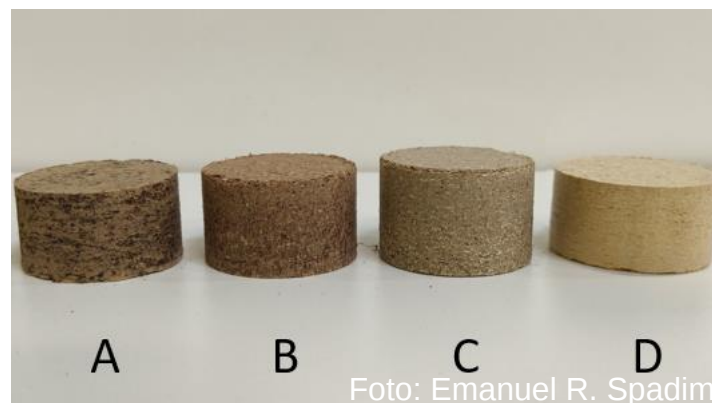


Foto: Emanuel R. Spadim

Foram produzidos 56 briquetes para cada uma das quatro biomassas, que foram submetidos à combustão em amostras com grupos de 14 briquetes por queima, sendo feitos, portanto, quatro repetições por biomassa.

3.2.3 Determinação das densidades e porosidade

Após a prensagem, a densidade aparente foi determinada através da relação entre a massa e o volume dos briquetes, seguindo metodologia adaptada da norma ABNT NBR 6922/81.

A porosidade foi obtida de forma indireta e adaptada, através do método usado pela Embrapa (2017) para determinação da porosidade de solos. O método consiste em determinar a densidade das partículas existentes em um elemento, descontando seus vazios e, posteriormente, fazer a relação entre a densidade das partículas e a densidade do solo, como segue na equação (3.3):

$$P = \frac{(D_p - D)}{D_p} \quad (3.3)$$

Em que,

P – Porosidade, %;

D_p – Densidade das partículas, g.cm^{-3}

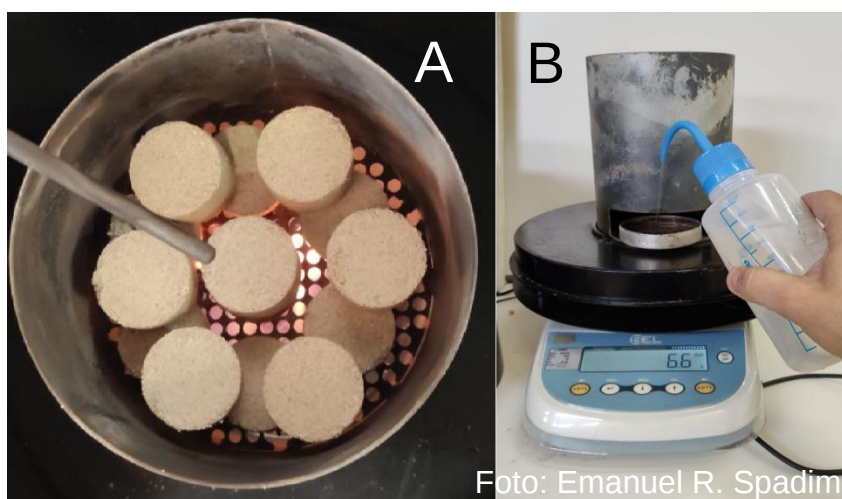
D – Densidade do briquete, g.cm^{-3} .

3.2.4 Determinação do ICOM e ICOMa

Para garantir uma condição similar na combustão, os briquetes foram colocados no queimador com a mesma disposição em todos os ensaios. O álcool foi colocado em um recipiente de alumínio que fica sob a peneira do queimador para proceder a ignição dos briquetes.

Diferentemente do experimento de Quirino & Brito (1991), onde foram utilizados 14 ml de álcool, neste experimento foram usados 40 g de álcool etílico P.A. de $0,8 \text{ g mL}^{-1}$ de densidade. Os testes preliminares mostraram que aquela quantidade não é suficiente para iniciar a combustão das biomassas utilizadas nas condições deste trabalho, possivelmente pelo fato de a madeira demorar mais tempo que o carvão para chegar à combustão. A disposição dos briquetes e o recipiente de álcool para ignição estão exemplificados na Figura 15.

Figura 15 - Disposição dos briquetes no queimador e recipiente de álcool



A: Vista superior dos briquetes no queimador B: Recipiente com álcool

Ainda seguindo o procedimento de Quirino & Brito (1991), os briquetes foram queimados e sua perda de massa e temperatura foram monitoradas pelo período em

que esta permaneceu acima de 150 °C, tendo sido, neste experimento, sempre a temperatura quem determinou o fim do ensaio, pois todos os briquetes ensaiados arrefeceram aos 150 °C antes de atingidos os 120 minutos de ensaio, determinado pelos autores como o tempo máximo de coleta.

A temperatura e perda de massa foram monitoradas pelo programa de computador, conforme Figura 16, e os dados foram coletados para cada uma das biomassas.

Figura 16 - Queima da biomassa para obtenção do ICOM e ICOMa



Esperou-se pelo esfriamento do conjunto entre as queimas, para que o calor gerado pela biomassa anterior não influenciasse na coleta dos dados da biomassa seguinte.

3.2.5 Análise estatística

Para os dados oriundos da composição química imediata, do poder calorífico superior e do ensaio do ICOM e ICOMa foi gerada uma matriz de correlação de Pearson entre as características observadas, bem como seu valor p .

Após a confirmação da homogeneidade da variância dos resíduos pelo teste de Bartlett (1937) e da normalidade destes pelo teste de Shapiro-Wilk (1965), foi realizada uma análise de variância (ANOVA) complementada pelo teste de comparação

de médias de Tukey (1949), com os valores de ICOM encontrados para cada biomassa ensaiada, sendo estas consideradas os tratamentos neste caso. O mesmo procedimento foi feito para o ICOMa. As diferenças foram consideradas significativas quando $p\text{-valor} < 0,05$. Este procedimento foi usado para mostrar que diferenças de resultado que ocorreram entre biomassas usando-se o método do ICOM podem não ocorrer quando usando o método do ICOMa, mostrando, assim, uma diferença de sensibilidade entre os índices.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas e químicas dos briquetes

A distribuição das médias das granulometrias dos materiais antes da briquetagem podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica das biomassas antes da briquetagem

	Abertura da malha da peneira (mm)			
	1,18	0,425	0,25	<,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

As biomassas, em sua maioria, tiveram a maior parte de seu material retido entre as peneiras de 1,18 mm e 0,425 mm, tendo como exceção apenas a casca de algodão, que ficou retida já na peneira de 1,18 mm por ter fibras que se aglomeram e não passam pela peneira.

O consumo de massa em função do tempo de ensaio até o momento de máxima temperatura ajustada é apresentado nas Figuras 17, 18, 19 e 20, para cada uma das biomassas. Os gráficos nas partes superiores das figuras foram ajustados pelos pontos originários de todas as amostragens (A), e os gráficos abaixo foram ajustados pelos pontos das amostragens individuais (B).

Pelo parâmetro angular das regressões apresentadas, obteve-se as taxas de queima das biomassas.

Figura 17 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de casca de algodão

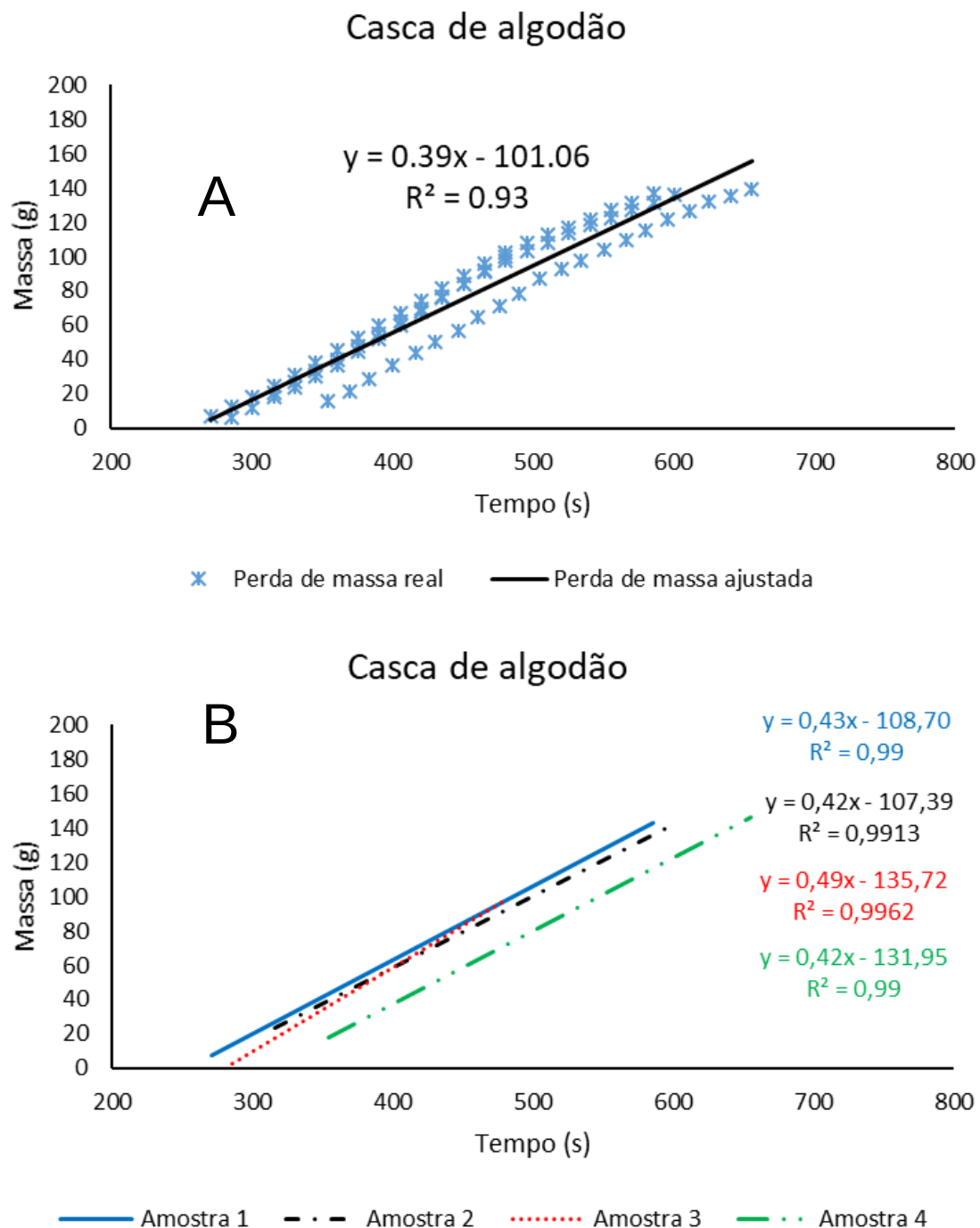


Figura 18 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar

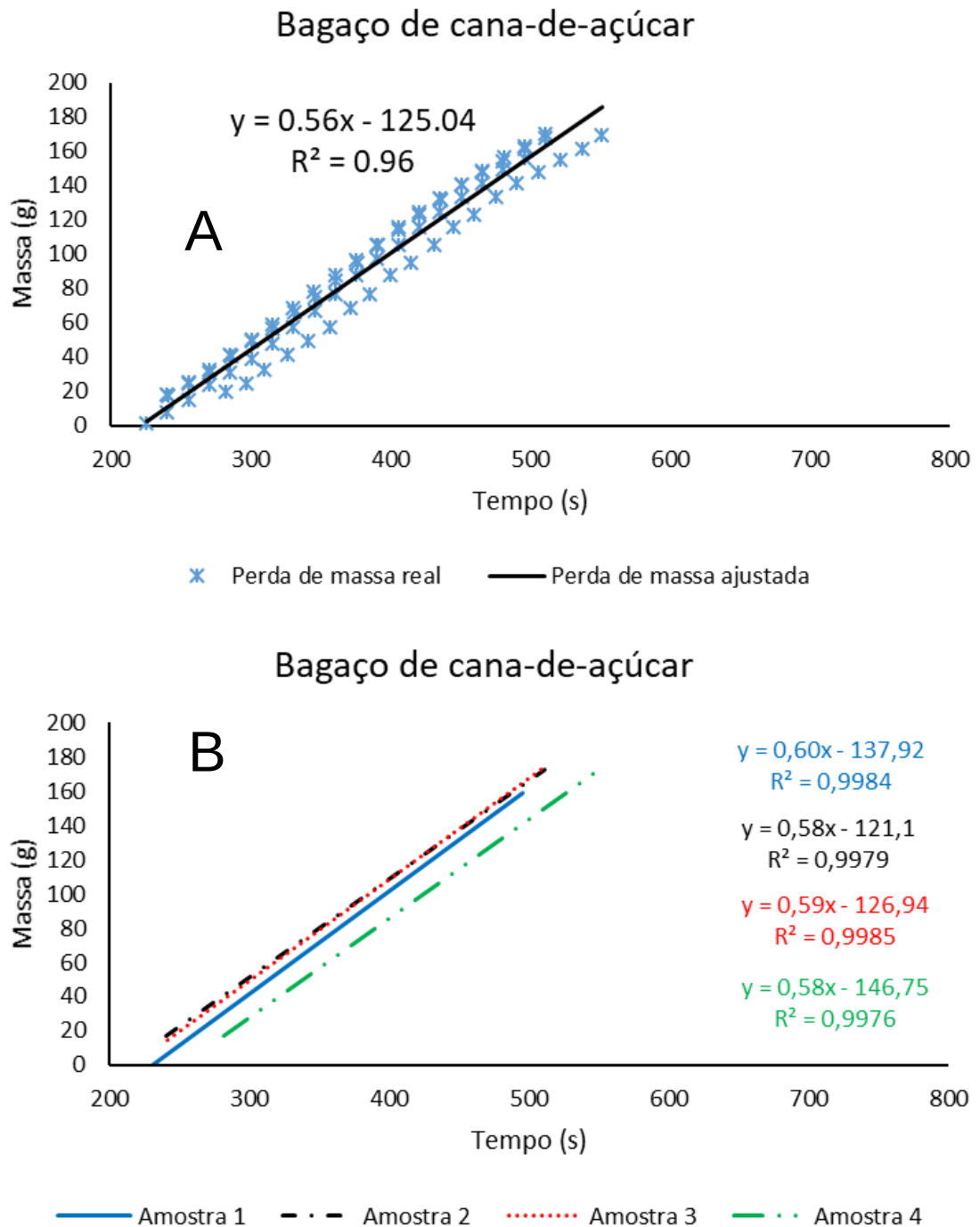


Figura 19 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de madeira de toco de eucalipto

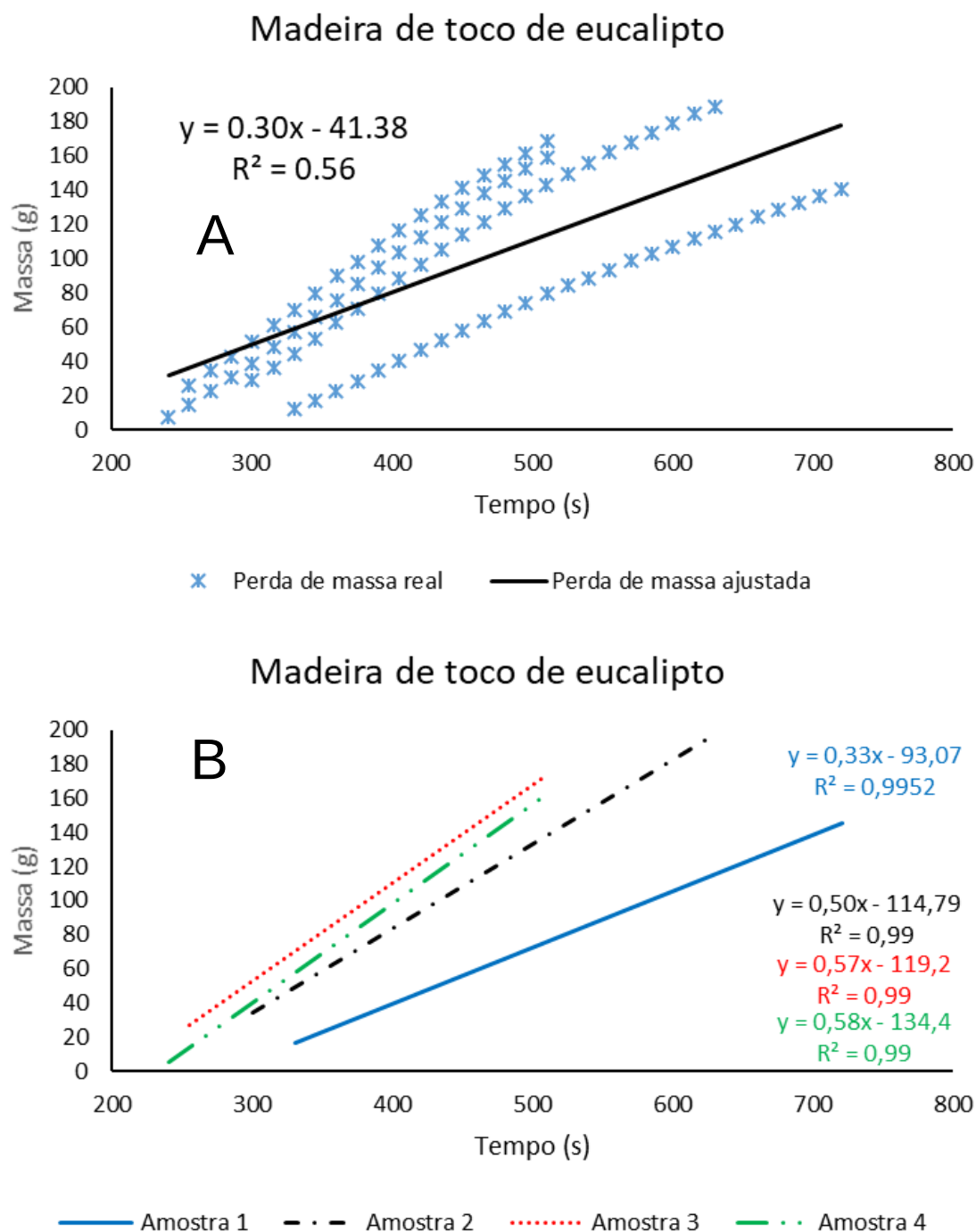
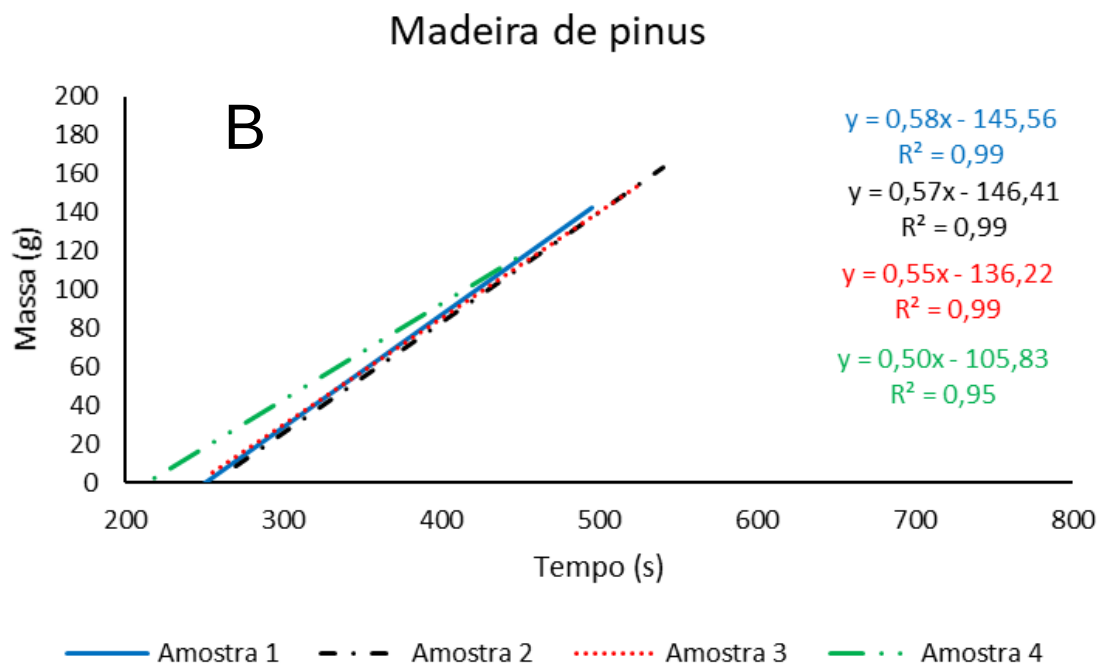
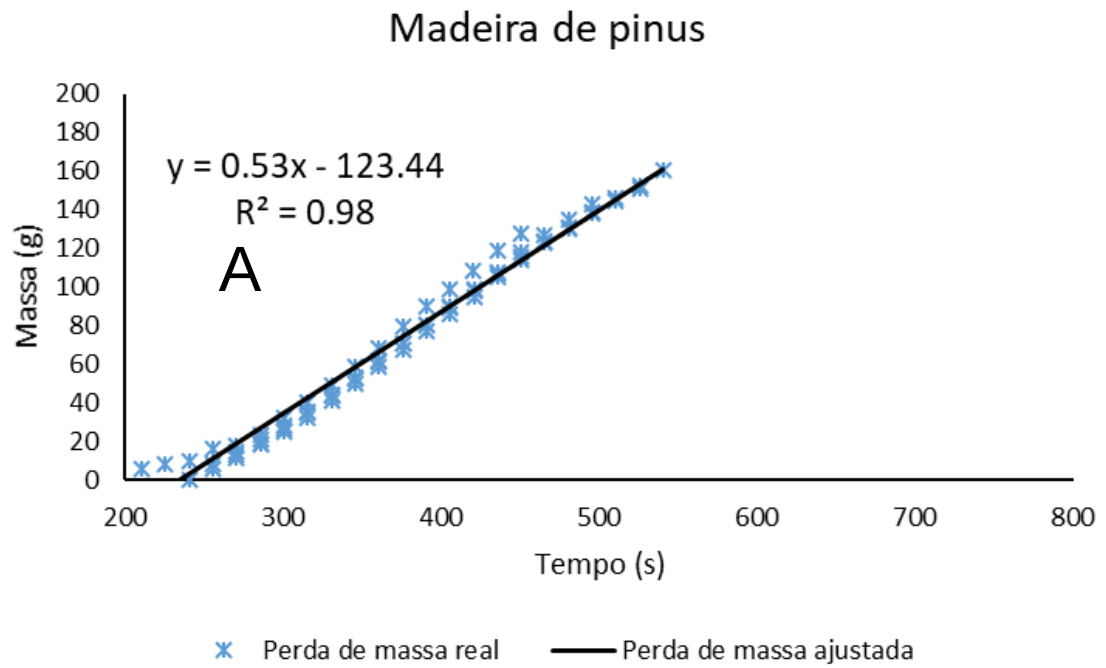


Figura 20 - Regressões de perda de massa em função do tempo durante a queima, para briquetes de madeira de pinus



A análise imediata e o poder calorífico superior das amostras estão descritos 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 poder calorífico guarda uma relação positiva com o teor de carbono fixo bem como com o teor de materiais voláteis, sendo menor neste que naquele. Já com o teor de cinzas, a relação é negativa (DEMIRBAŞ, 1997). No geral, esse comportamento foi encontrado nas biomassas estudadas.

O fato de as médias do poder calorífico superior das biomassas de casca de algodão e de bagaço de cana-de-açúcar não guardarem entre si a relação sugerida por Demirbaş (1997) na comparação entre análise elementar e poder calorífico, é possivelmente explicado pela 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.

Nas Figuras 21, 22, 23 e 24 pode-se perceber que as curvas de temperatura apresentaram variação em suas formas. Estas variações reforçam a hipótese de que o ICOM estaria sujeito à perda de sensibilidade com a variação da forma da regressão da temperatura.

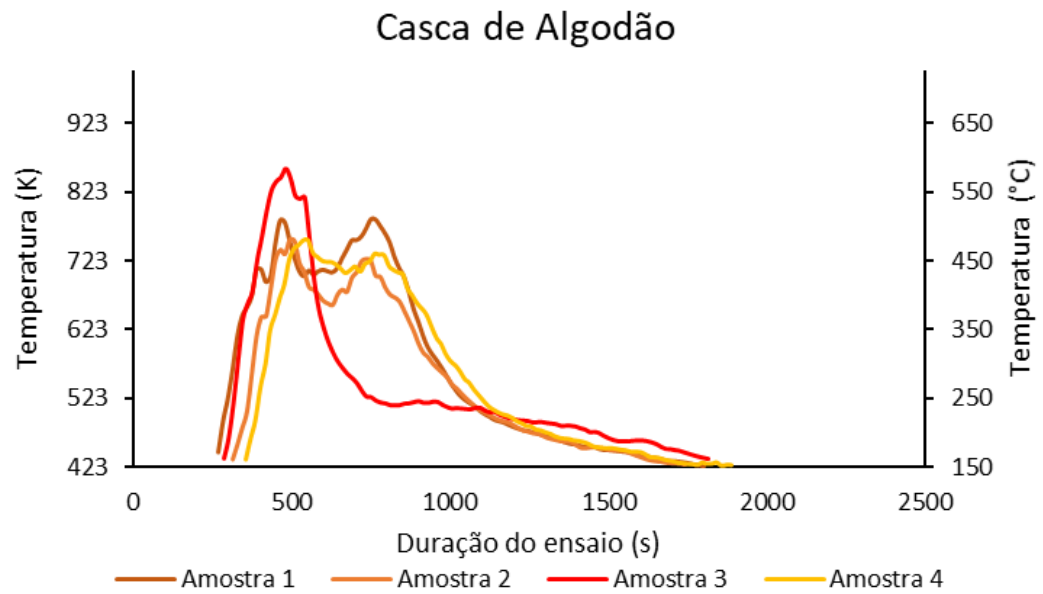
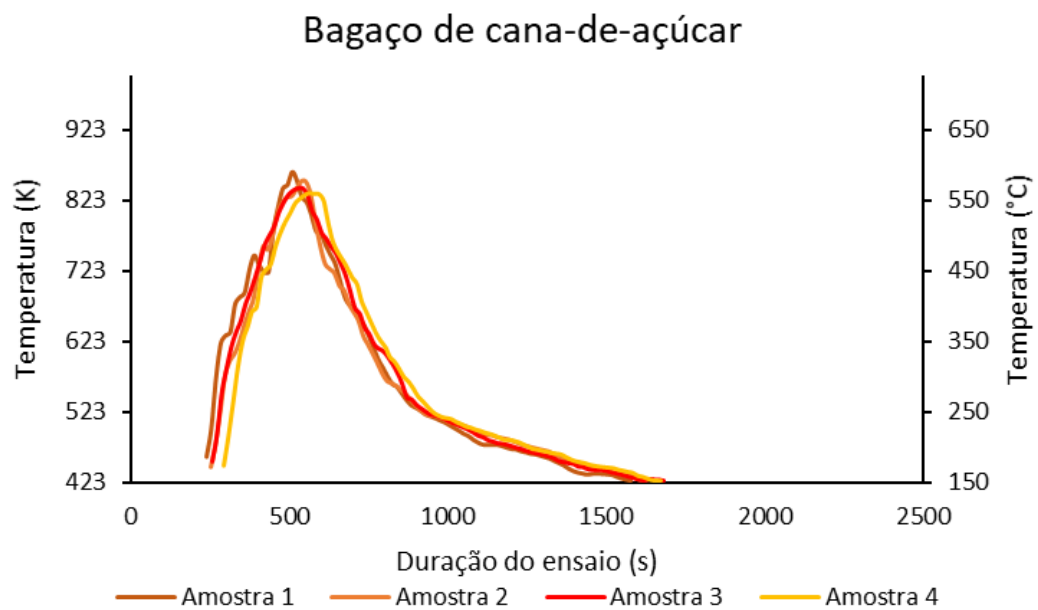
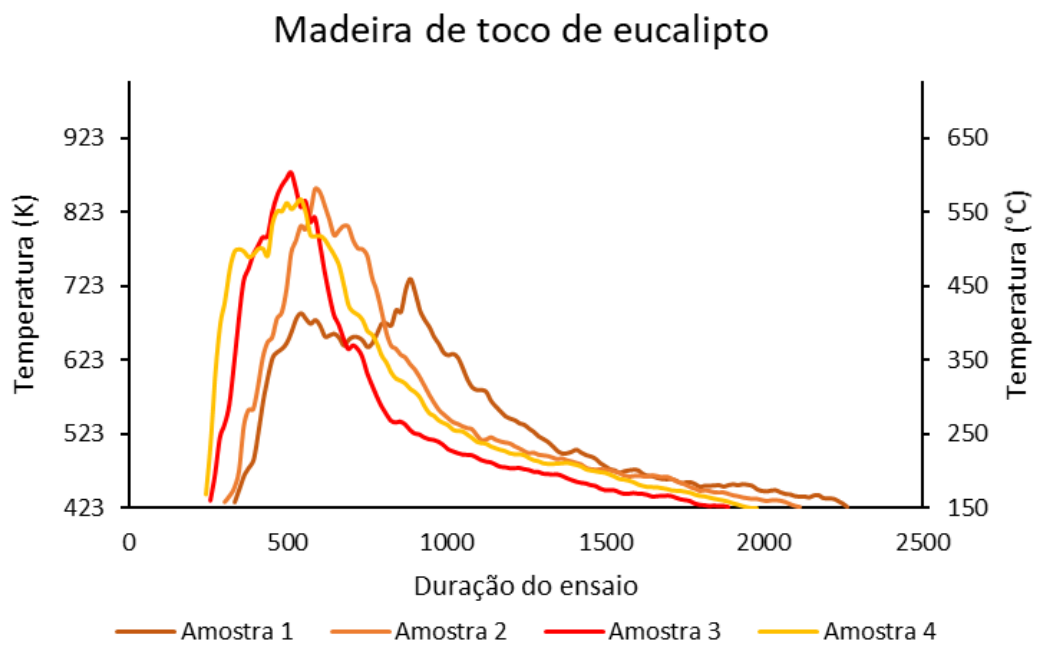
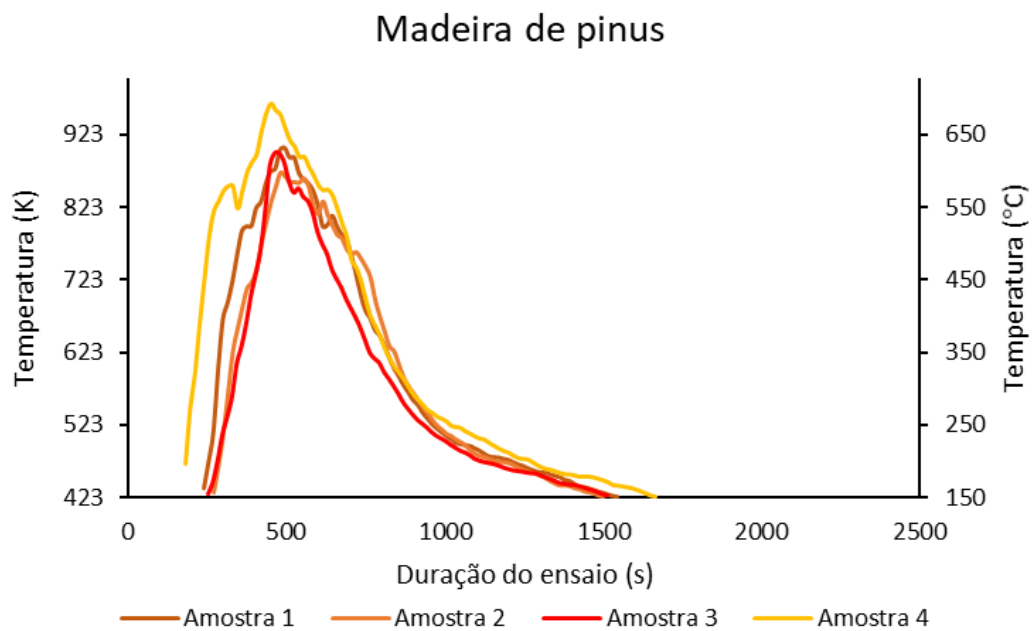
Figura 21 - Curvas de queima da biomassa de casca de algodão**Figura 22 - Curvas de queima da biomassa de cana-de-açúcar**

Figura 23 - Curvas de queima da biomassa de madeira de toco de eucalipto**Figura 24 - Curvas de queima da biomassa de madeira de pinus**

4.2 Índices de combustão (ICOM e ICOMa)

Foi feita uma análise de variância (ANOVA) para ambos os métodos de cálculo do índice de combustão. O método do ICOM não apresentou diferença entre as biomassas ao nível de significância de 5%, enquanto o ICOMa sim. Procedeu-se então com um teste de comparação de médias para este último método, que pode ser visto na Tabela 3.

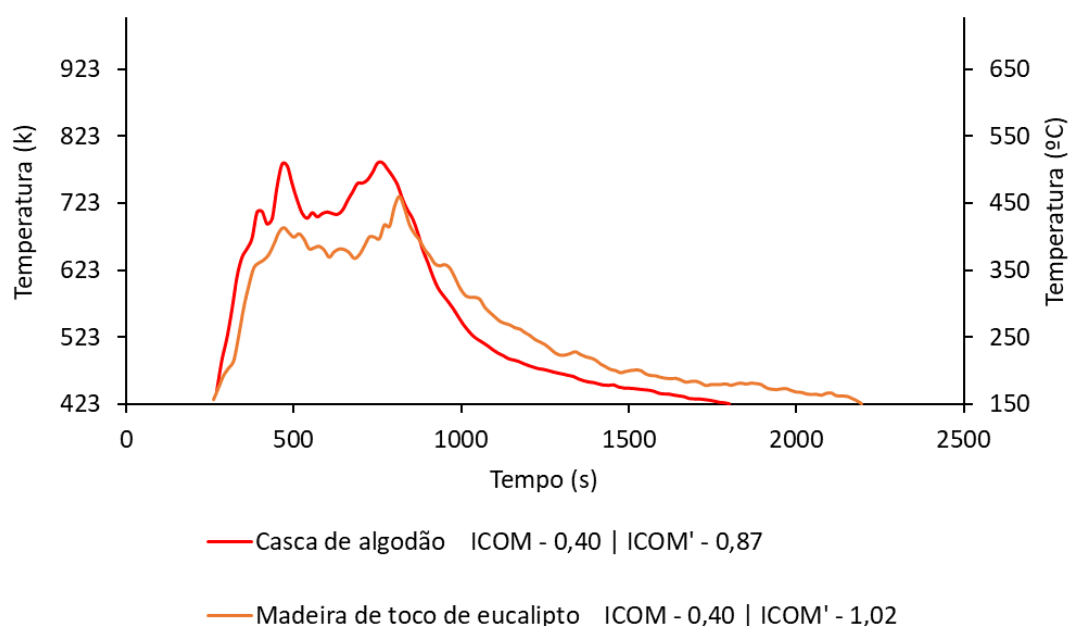
Tabela 3 - Médias de ICOM e ICOMa

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.

Há no método de cálculo do ICOMa uma diferença estatisticamente significativa entre a biomassa de madeira de toco de eucalipto e as biomassas de bagaço de cana-de-açúcar e madeira de pinus, assim como entre a madeira de pinus e a casca de algodão, que não foi revelada pelo método do ICOM.

Exemplificando a origem da diferença de análise dos métodos, na Figura 25 é apresentada uma comparação entre dois gráficos de duas amostras com perda de massa muito semelhantes, com os dados de temperatura de uma amostra para cada uma das biomassas de madeira de toco de eucalipto e casca de algodão, mostrando a diferença de área sob seus pontos. Na legenda, pode-se ver a representação numérica dos diferentes índices de combustão para ambos os métodos e as diferentes variações entre amostras, dentro de cada método.

Figura 25 - Curvas de temperatura com diferentes áreas

Na Tabela 4 estão as médias das densidades, porosidade e taxas de queima dos materiais.

A porosidade dos briquetes foi avaliada para caracterização da amostra, pelo fato de esta característica guardar relação com a compactação do briquete, sendo menor a porosidade quanto mais compactado o briquete for.

A alta compactação causa diminuição da taxa de queima de combustíveis sólidos prensados por diminuírem o fluxo de oxigênio no interior do briquete durante a queima (DAVIES, 2009; ONUBUGBU; EKPUNOBI, 2011).

Tabela 4 - Densidades, porosidades e taxas de queima

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

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

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

Foi feita uma análise dos dados de ensaio usando-se a matriz de correlação de Pearson, que pode ser vista na Tabela 5. As correlações com módulos maiores ou iguais a 0,7 estão destacadas em negrito.

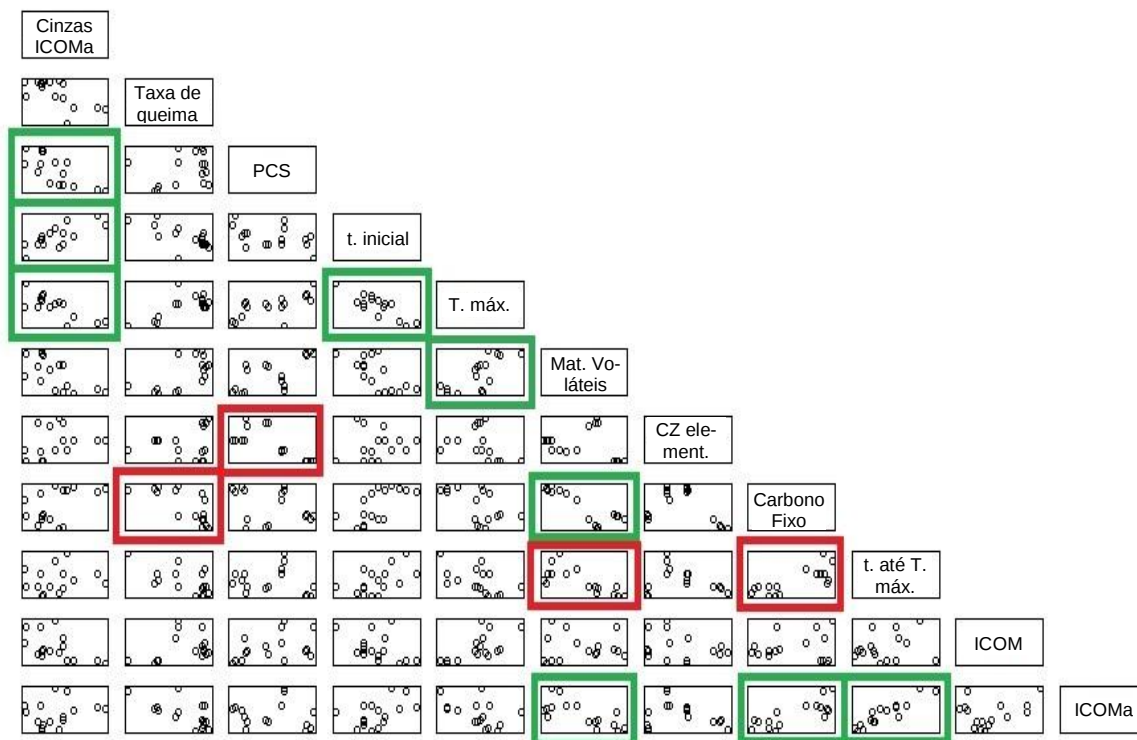
Tabela 5 - Matriz de correlação de Pearson e valores p

Cinzas ICOMa									
-0,65 (0,006)	Taxa de queima								
-0,74 (0,001)	0,29 (0,283)	PCS							
0,74 (0,001)	-0,66 (0,005)	-0,47 (0,067)	t. inicial						
-0,77 ($<0,001$)	0,67 (0,004)	0,66 (0,006)	-0,83 ($<0,001$)	T, max					
-0,66 (0,006)	0,65 (0,006)	0,69 (0,003)	-0,68 (0,004)	0,72 (0,002)	Mat. Voláteis				
0,32 (0,228)	0,18 (0,508)	-0,74 (0,001)	0,03 (0,915)	-0,33 (0,218)	-0,21 (0,427)	CZ elementar			
0,47 (0,064)	-0,73 (0,001)	-0,29 (0,283)	0,64 (0,007)	-0,53 (0,036)	-0,86 ($<0,001$)	-0,31 (0,237)	Carbono Fixo		
0,21 (0,427)	-0,62 (0,01)	-0,18 (0,503)	0,54 (0,031)	-0,53 (0,034)	-0,74 (0,001)	-0,07 (0,799)	0,76 (0,001)	t. até T. máx.	ICOM
-0,55 (0,028)	0,29 (0,268)	0,42 (0,106)	-0,41 (0,111)	0,65 (0,007)	0,06 (0,84)	-0,3 (0,267)	0,1 (0,711)	0,22 (0,41)	
0,30 (0,26)	-0,64 (0,006)	-0,17 (0,529)	0,54 (0,0310)	-0,52 (0,039)	-0,75 ($<0,001$)	-0,11 (0,673)	0,79 ($<0,001$)	0,94 ($<0,001$)	
								0,27 (0,320)	ICOMa

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

As correlações destacadas na Tabela 5 são também destacadas em sua apresentação gráfica na Figura 26.

Figura 26 - Matriz gráfica de correlação



Em verde as variáveis com correlações acima de 0,7 e com dispersões aparentemente menores e, em vermelho, as aparentemente dispersas, apesar do alto coeficiente de correlação.

A correlação entre teor de carbono fixo e de materiais voláteis foi bastante alta, mas prescinde de discussão por ser uma relação intrínseca do material, já que a biomassa é composta por esses materiais quase que em sua totalidade e, portanto, um seria praticamente complementar do outro.

A correlação entre t.inicial (tempo em que a temperatura chega aos 150 °C) e T. máxima (temperatura máxima registrada durante o ensaio) também foi bastante expressiva. Esta correlação pode levar à hipótese de que uma biomassa que tem rápida rampa de aquecimento chegará a maiores temperaturas, mas também pode ser uma consequência da baixa temperatura de ignição, que pode ter permitido que os briquetes entrassem juntos em combustão, fazendo com que fossem altas tanto a taxa de crescimento da temperatura quanto a temperatura máxima.

A variável Cinzas ICOMa teve correlações importantes com o PCS (poder calorífico superior), com a t. inicial e com a T. máxima.

A correlação negativa entre a Cinzas ICOMa e o PCS é explicada pela não contribuição dos minerais para a produção de calor (DEMIRBAŞ, 1997; UZUN et al., 2017; HOSSEINPOUR et al., 2017).

Apesar da dispersão aparentemente alta vista na Figura 26, o t. até T. máx. (tempo até atingir a temperatura máxima) teve correlação positiva com a quantidade de carbono fixo e negativa com a quantidade de materiais voláteis, ou seja, materiais com maior teor de carbono fixo demoraram mais até atingir a temperatura máxima, enquanto aqueles mais ricos em materiais voláteis chegaram mais rápido a altas temperaturas.

No caso do carvão, por exemplo, a temperatura de ignição diminui com o aumento de teor de materiais voláteis (SUN; ZHANG, 1998) (CHEN; MORI; PAN, 1995). Esta característica também pode ser entendida, de forma mais genérica, para a biomassa (GROTKJÆR et al., 2003).

Entende-se que a baixa temperatura necessária para a ignição de biomassas com alto teor de materiais voláteis faz com que estas entrem em combustão mais cedo, chegando mais cedo à temperatura máxima.

Este entendimento também pode ajudar a explicar a correlação observada entre o ICOMa e os teores de carbono fixo e de materiais voláteis, que foi negativa em relação a este e positiva em relação àquele.

Os materiais voláteis são os primeiros a serem queimados em uma combustão homogênea (ESSENHIG; MISRA; SHAW, 1989), que é a mais provável para a condição deste ensaio, dado o tamanho das partículas dos briquetes e a baixa taxa de aquecimento no processo de ignição.

Esta queima rápida dos voláteis pode promover um pico de calor que também se resfria mais rapidamente, influenciando na área sob a curva de temperatura usada no cálculo do ICOMa. O contrário é verdadeiro para materiais com maior concentração de carbono fixo, que não atingem um pico tão alto de temperatura, mas que mantêm um calor por mais tempo, gerando uma curva de temperatura mais plana e ampla, e que determinou a alta correlação entre ICOMa e t. até T máx.

Outra correlação que vai ao encontro destas proposições é a relação inversa entre a taxa de queima e o teor de carbono fixo da biomassa, e direta, apesar de pequena, com o teor de materiais voláteis.

A maior correlação encontrada foi entre t até $T. \text{máx.}$ e o ICOMa, ou seja, a biomassa que gera taxas de ganho de temperatura mais baixas são as que têm maior ICOMa. Esta característica tem aplicação prática no planejamento da alimentação de máquinas térmicas a biomassa.

O ICOMa não apresentou correlação com o PCS, conforme esperado no início do trabalho.

O ICOM não apresentou correlação importante com as demais variáveis analisadas.

5 CONCLUSÕES

O aplicativo e o dispositivo desenvolvidos foram eficazes na determinação dos índices de combustão, bem como no seu cálculo, possibilitando fazê-lo de forma prática e automática.

A relação entre a temperatura e a perda de massa na combustão (que são a base do 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 usado o método do ICOMa. O mesmo não ocorreu com o ICOM, que indicava não haver diferença estatisticamente significativa entre as biomassas.

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

Biomassas com maiores teores de carbono fixo apresentaram maior ICOMa, sendo esta relação inversa quando comparada ao teor de materiais voláteis.

A taxa de queima foi menor quanto maior o teor de carbono fixo presente na biomassa.

O ICOM não apresentou correlação importante com nenhuma das variáveis avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ALÓ, L. L.; KONISHI, P. A.; BELINI, G. B.; DA SILVA, J. P.; MARTINS, M. P.; NAKASHIMA, G. T.; CARASCHI, J. C.; YAMAJI, F. M. Briquettes of Sugarcane Bagasse and Eucalyptus spp Sawdust: Characterization and Hygroscopic Equilibrium. **Revista Virtual de Química**, p. 774–785, 2017.
- 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**, v. 37, n. 13, 2016.
- AMAYA, A.; MEDERO, N.; TANCREDI, N.; SILVA, H.; DEIANA, C. Activated carbon briquettes from biomass materials. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1635–1641, 2007.
- BARTLETT, M. S. Properties of Sufficiency and Statistical Tests. In: 160. ed. Berks. p. 268–282.
- 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, n. 51, p. 81–107, 2006.
- BENTSEN, N. S.; NILSSON, D.; LARSEN, S. Agricultural residues for energy - A case study on the influence of resource availability, economy and policy on the use of straw for energy in Denmark and Sweden. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 278–288, 2018.
- BIOMASSABR. **Briquetes e Péletes**. 2013. Disponível em: <<http://www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=2044>>. Acesso em: 16 dez. 2019.
- BIOMAX. **O que é briquetagem**. 2019. Disponível em: <<https://www.biomaxind.com.br/briquetagem/>>. Acesso em: 1 jun. 2019.
- BORGES, A. C. P.; SILVA, M. S.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Renewable energy: a contextualization of the biomass as power supply. **REDE: Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 02, p. 23–36, 2016.
- CHEN, Y.; MORI, S.; PAN, W. P. Estimating the Combustibility of Various Coals by TG-DTA. **Energy and Fuels**, v. 9, n. 1, p. 71–74, 1995.
- CHOU, C.-S.; LIN, S.-H.; PENG, C.-C.; LU, W.-C. The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 7–8, p. 1041–1046, 2009.
- CHOUDER, A.; SILVESTRE, S.; TAGHEZOUIT, B.; KARATEPE, E. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. **Solar Energy**, v. 91, p. 337–349, 2013.
- CHRISOSTOMO, W. Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido. 2011. 56 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- CO2 Emissions Global Carbon Atlas. 2019. Disponível em: <<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- DAVIES, R. Ignition and Burning Rate of Water Hyacinth Briquettes. **Journal of Scientific Research and Reports**, v. 2, n. 1, p. 111–120, 2013.
- DEMIRBAŞ, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel and Energy Abstracts**, Turkey. v. 76, n. 5, p. 431–434, 1997.
- ELLIS, W. S.; JONES, R. T. Using LabVIEW to facilitate calibration and verification for respiratory impedance plethysmography. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, v. 36, n. 4, p. 169–175, 1991.

EMBRAPA, E. brasileira de P. A. I Plano Diretor da Embrapa Agroenergia 2008-2011-2023. [s.l: s.n.].

ENGLERTH, G. H. Framework of qualitative relationships in wood utilization. **U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory**, v. 45, n. January, p. 1–20, 1966.

EPE. **Balanço energético nacional**. 2019. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório Síntese BEN 2019 Ano Base 2018.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2019.

ERTUGRUL, N. Towards Virtual Laboratories: A Survey of LabVIEW-based Teaching/ Learning Tools and Future Trends. **International Journal of Engineering Education**, v. 16, n. 3, p. 171–180, 2000.

ESSENHUGH, R. H.; MISRA, M. K.; SHAW, D. W. Ignition of coal particles: A review. **Combustion and Flame**, v. 77, n. 1, p. 3–30, 1989.

EUFRATE JUNIOR, H. de 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**, v. 108, p. 636–640, 2017.

FERRAND, P. GPScan.VI: A general-purpose LabVIEW program for scanning imaging or any application requiring synchronous analog voltage generation and data acquisition. **Computer Physics Communications**, v. 192, p. 342–347, 2015.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101–106, 2010.

GALBIATI, J. K.; GALLO, C. A.; LAVANHOLI, M. das G. D. P. Produção De Energia Elétrica a Partir Da Queima Do Bagaço De Cana-De-Açúcar. **Nucleus**, v. 7, n. 1, p. 127–138, 2010.

GANI, A.; SALAMI, M. J. E. A LabVIEW based data acquisition system for vibration monitoring and analysis. In: STUDENT CONFERENCE ON RESEARCH AND DEVELOPMENT 2002, **Anais...** : IEEE, 2002.

GARCIA, É. A.; GUERRA, S. P. S.; EUFRATE JUNIOR, H. D. J.; SANSÍGOLO, C. A.; LANÇAS, K. P.; YAMAJI, F. M. Chemical analysis of wood with bark in short rotation forestry systems. **Revista Arvore**, v. 40, n. 1, p. 163–171, 2016.

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**, v. 117, p. 173–179, 2018.

GONÇALVES, B. F.; YAMAJI, F. M.; FERNANDEZ, B. O.; RÓZ, A. L. Da; FLORIANO, F. S. Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de Eucalyptus grandis para confecção de briquetes. **Revista do Instituto Florestal**, v. 25, n. 2, p. 205–213, 2013.

GROTKJÆR, T.; DAM-JOHANSEN, K.; JENSEN, A. D.; GLARBORG, P. An experimental study of biomass ignition. **Fuel**, v. 82, n. 7, p. 825–833, 2003.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass Briquetting: Technology and Practices. Regional wood energy development programme in Asia GCP/RAS/154/NET, Field document No. 46. **Regional Wood Energy Development Programme in Asia**, n. 46, p. 1–48, 1996.

GUERRA, S. P. S. ; EUFRATE-JUNIOR, H. J. ; LEONELLO, E. C. ; BRITO, C. M. ; COSTA, A. C. L. A. ; PASSOS, J. R. S. Poder calorífico dos tocos e raízes de florestas plantadas de eucalipto. In: SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA; HUMBERTO DE JESUS EUFRATE JÚNIOR (Eds.). **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. 1. ed. Botucatu. p. 173.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 712–725, 2015.

HABERL, H.; ERB, K. H.; KRAUSMANN, F.; RUNNING, S.; SEARCHINGER, T. D.; KOLBY SMITH, W. **Bioenergy: How much can we expect for 2050?**, IOP Publishing, 2013.

HAMED, B. Design & Implementation of Smart House Control Using LabVIEW. **Design & Implementation of Smart House Control Using LabVIEW**, v. Volume: 1, n. Volume: 1, Number: 6, 2012.

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**, v. 138, p. 473–479, 2017.

IEA. **IEA**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/weo/>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 3, p. 1082–1090, 2010.

KALKMAN, C. J. LabVIEW: A software system for data acquisition, data analysis, and instrument control. **Journal of Clinical Monitoring**, v. 11, n. 1, p. 51–58, 1995.

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1092–1105, 2016.

LI, J.; SONG, Y.; MAO, Y.; MAO, Z.; WU, Y.; LI, M.; HUANG, X.; HE, Q.; HU, M. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during the harvest season in eastern China's agricultural regions. **Atmospheric Environment**, v. 92, p. 442–448, 2014.

MENEZES, W. M. De; SANTINI, E. J.; SOUZA, J. T. De; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Modificação térmica nas propriedades físicas da madeira. **Ciência Rural**, v. 44, n. 6, p. 1019–1024, 2014.

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. Data Acquisition with LabVIEW. In: **Measurement and Instrumentation: Theory and application**. Academic press, 2012.

MUAZU, R. I.; STEGEMANN, J. A. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. **Fuel**, v. 194, p. 339–347, 2017.

NAKASHIMA, G. T.; ADHMANN, I. C. S.; HANSTED, A. L. S.; BELINI, G. B.; WALDMAN, W. R.; YAMAJI, F. M. **Materiais Lignocelulósicos: Caracterização e Produção de Briquetes**, 2017.

NALINI, M. Blood glucose regulation using labview. **International Journal of Chemical & Material Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2018.

NIU, X.; HO, S. S. H.; HO, K. F.; HUANG, Y.; SUN, J.; WANG, Q.; ZHOU, Y.; ZHAO, Z.; CAO, J. Atmospheric levels and cytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and oxygenated-PAHs in PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 1075–1084, 2017.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICH, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 155–164, 2017.

ONUBUGU, T.; EKPUNOBI, U. Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend. **IJRRAS**, v. 7, n. May, p. 153–159, 2011.

PROTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113–122, 2011.

QUIRINO, W. F. Briquetagem de resíduos ligno - celulósicos. **Embrapa**, Brasília. p. 1–10, 1991.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. **LPF - Série Técnica**, n. 13, 1991.

RAHAMAN, S. A.; SALAM, P. A. Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder. **Fuel Processing Technology**, v. 158, p. 9–19, 2017.

RAJU, C.; JYOTHI, K.; SATYA, M.; PRAVEENA, U. Studies on Development of Fuel Briquettes for Household and Industrial Purposes. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 54-63, 2014..

SETTE JR, C. R.; FREITAS, P. C.; FREITAS, V. P.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 4, p. 922–930, 2016.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, 1965.

SHARIFF, F.; RAHIM, N. A.; HEW, W. P. Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 3, p. 1730–1742, 2015.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 5, p. 499–507, 2005.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. Forest Products and Wood Science An Introduction. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2011.

SILVA, D. A.; YAMAJI, F. M.; DE BARROS, J. L.; DA RÓZ, A. L.; NAKASHIMA, G. T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, Curitiba - PR. v. 45, n. 4, p. 713–722, 2015.

SILVA, J. W. F. Da; 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 - PR. v. 6, n. 4, p. 624–646, 2017.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 2, p. 910–918, 2011.

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

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**, v. 244, p. 379–387, 2019.

TARASOV, D.; SHAHI, C.; LEITCH, M. Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. **ISRN Forestry**, p. 6, 2013.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa**. Brasília.

TUKEY, J. W. Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, 1949.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683–707, 2011.

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, v. 234, p. 122–130, 2017.

WHO. **Household air pollution from cooking, heating and lighting**. 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/sustainable-development/housing/health-risks/household-air-pollution/en/>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

WUEBBLES, D. J.; JAIN, A. K.; WATTS, R. G. Concerns about Climate Change and Global Warming. In: WATTS, R. G. (Ed.). **Innovative Energy Strategies for CO₂ Stabilization**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. p. 1–26.

YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; FLORES, W. D. P. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BRIQUETES. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 11, 2013.

YANK, A.; NGADI, M.; KOK, R. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 84, p. 22–30, 2016.