

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

CARACTERIZAÇÃO E BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS FLORESTAIS

ELAINE ROBALDO SANTANA

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

CARACTERIZAÇÃO E BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS FLORESTAIS

ELAINE ROBALDO SANTANA

Orientadora: PROF^a. LEIDY ZULYS LEYVA RAFULL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências para conclusão do curso de Engenharia Agrícola.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S232c Santana, Elaine Robaldo
CARACTERIZAÇÃO E BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS FLORESTAIS [recurso eletrônico]
/ Elaine Robaldo Santana. -- 2019.
Arquivo em formato pdf.

Orientadora: LEIDY ZULYS LEYVA RAFULL.

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2019.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. BIOMASSA. 2. BRIQUETES. 3. CAVACOS. 4. ENERGIA. I. Rafull, Leidy Zulys Leyva. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

CARACTERIZAÇÃO E BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS FLORESTAIS

Por

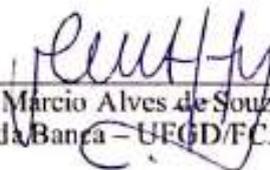
Elaine Robaldo Santana

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

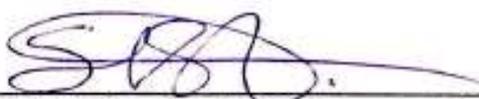
Aprovado em: 27 de novembro de 2019.



Profa. Leidy Zulys Leyva Rafull, DSc
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Cristiano Márcio Alves de Souza, DSc
Membro da Banca – UFGD/FCA



Prof. Sálvio Napoleão Soares Arcoverde, DSc
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e coordenação que oportunizaram essa janela e, em especial, a todos os professores do curso pelos ensinamentos transmitidos e excelência de ensino que me proporcionaram.

A minha orientadora Prof^a Dr^a Leidy Zulys Leyva Rafull, pelo suporte, pelas correções e incentivos. Por ter me acolhido como uma mãe.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A minha filha Luiza Santana Tertuliano, que foi e sempre será minha âncora, minha base, por nunca me deixar desistir e por quem sempre me manteve firme e forte até aqui.

E a todos que, direta e indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

Página

RESUMO

.....vii

ABSTRACT

.....viii

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Resíduos madeireiros.....	4
2.2. Alternativas Tecnológicas para o uso dos resíduos florestais.....	6
2.3. Características dos resíduos florestais	9
2.4. Fragmentação de resíduos florestais para fabricação de cavacos	11
2.5. Briquetagem de resíduos florestais	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Local e coleta de resíduos florestais	14
3.2. Caracterização dos resíduos florestais	15
3.3 Densificação dos resíduos florestais	18
3.4. Análises estatísticas	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÃO.....	33
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

SANTANA, Elaine Robaldo. Caracterização e briquetagem de resíduos florestais. 2019. 42p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

A madeira é a fonte de energia mais antiga utilizada pelo homem e é uma grande geradora de resíduos, que começam a ser produzidos desde o momento da colheita. Entre as alternativas existentes para dar fim aos resíduos florestais, está o uso para fins energéticos. Mesmo sendo a queima uma forma muito prática para aproveitar os resíduos in natura, suas características acabam influenciando no aproveitamento energético. Para que os resíduos florestais sejam eficientemente aproveitados essas características devem ser adequadas por meio de processos de conversão. A densificação é um processo utilizado para aumentar a densidade da biomassa residual e o briquete um dos produtos resultantes. Este trabalho teve por objetivo caracterizar resíduos florestais in natura de *Eucalyptus grandis* e produzir briquetes de resíduos florestais para avaliar a influência da temperatura de aquecimento e da pressão de compactação da máquina sobre as características dos briquetes fabricados. A briquetagem foi conduzida avaliando a influência da temperatura de aquecimento (80, 110, 125 e 140 °C), e a pressão de compactação (10,34; 13,78 e 17,83 MPa) sobre diferentes características de briquetes (diâmetro, altura, volume, densidade aparente, densidade energética) e o índice de contração volumétrica. As características dos resíduos florestais obtidos no campo indicaram que estão aptos para serem densificados. A temperatura de aquecimento e a pressão de compactação influenciaram diretamente nas características estudadas dos briquetes de resíduos florestais, exceto o diâmetro que depende da temperatura na faixa estudada. Maiores temperaturas e maiores pressões de compactação permitem a formação de um briquete com menor altura, menor diâmetro, menor volume, maior densidade energética e maior índice de contração volumétrica. Os modelos ajustados foram capazes de prever os comportamentos das características avaliadas dos briquetes.

Palavras-chave: briquetes; densificação; energia da biomassa

ABSTRACT

Wood is the oldest source of energy used by man and is a large generator of waste, which begins to be produced from the moment of harvest. Among the alternatives available to end forest waste is energy use. Even though burning is a very practical way to take advantage of natural waste, its characteristics end up influencing the energy use. For forest residues to be efficiently harnessed these characteristics must be adapted through conversion processes. Densification is a process used to increase the density of residual biomass and briquette one of the resulting products. This work aimed to characterize fresh forest residues of *Eucalyptus grandis* and to densify them for briquettes production. Briquetting was conducted by evaluating the influence of heating temperature (80, 110, 125 and 140 °C), and the compaction pressure (1500, 2000 and 2500 Psi) on different briquettes characteristics (diameter, height, volume, bulk density, energy density) and the volumetric contraction index. The work allowed to conclude that: the heating temperature and the compaction pressure had a direct influence on the studied characteristics of the forest residue briquettes, except in the diameter, which little changed due to the briquetting matrix. Higher temperatures and higher compaction pressures allow the formation of a briquette with smaller height, smaller diameter, smaller volume, higher energy density and higher contraction index. The adjusted models were able to predict the behaviors of the evaluated characteristics.

Keywords: brickets; densification; biomass energy

1. INTRODUÇÃO

A Energia da Biomassa é uma alternativa energética ao uso de combustíveis fósseis e que vem sendo utilizada cada vez mais. Segundo Vidal e Hora (2011), a biomassa é todo material de origem orgânica, não fóssil, que contenha poder energético em sua composição química. A biomassa é uma fonte de energia renovável, pouco poluente, pois o dióxido de carbono liberado será utilizado pela planta para seu crescimento, processo conhecido como ciclo natural de carbono neutro e é extremamente barata quando comparada aos combustíveis fósseis, principalmente quando se trabalha com resíduos.

A madeira é a biomassa considerada a fonte de combustível mais antiga utilizada pelo homem para produzir energia. Essa fonte é uma grande geradora de resíduos, que começam a ser produzidos desde o momento da colheita.

Além da colheita florestal, outras fontes contribuem para a geração de resíduos de madeira, destacando-se a indústria de Celulose e Papel, de Painéis de Madeira, Moveleira, a construção civil com seus resíduos de obras, o comércio com o descarte de embalagens e as podas e remoção de árvores urbanas (MMA, 2009). Essas fontes acabam gerando um volume considerável de resíduos de madeira, que associados ao seu baixo aproveitamento, resultam em danos ambientais com os que a sociedade moderna convive atualmente. A disposição final desses resíduos em aterros sanitários é proibida pela lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Diante dessa proibição, começou a busca por alternativas para dar fim aos resíduos de madeira, indicando-se dois destinos principais: como matéria prima para produtos de maior valor agregado e para fins energéticos. Nesse sentido, Foelkel (2016) enfatiza a importância de entender que o uso de um resíduo descartado, não deve desmotivar a busca constante para a redução da quantidade gerada, porque o resíduo sempre vai ser considerado como desperdício ou ineficiência de um processo. A diminuição dos resíduos se consegue utilizando tecnologias eficientes, melhores práticas e muito maior conscientização por parte de todos.

Os resíduos da colheita florestal estão formados pelas partes da árvore que são descartadas após a colheita do tronco, como folhas, galhos, cascas, pontas e tocos e que são deixados no solo após o corte. Mesmo a permanência no campo dos resíduos florestais favorecer a ciclagem de seus nutrientes, o excesso desse material pode provocar sérios problemas nos campos, como incêndios e manutenção da umidade excessiva do solo favorecendo o desenvolvimento de fungos. Diante essa problemática, a retirada de grande parte desses resíduos é necessária, podendo ser usados como fonte de energia. Essa destinação apresenta-se como uma forma viável de uso na conjuntura atual, onde a energia da biomassa é

uma alternativa ao uso de derivados de petróleo. A energia proveniente da biomassa aproveita o poder do carbono biológico e o homem pode manejá-la de acordo com suas necessidades energéticas.

A queima dos resíduos florestais in natura constitui uma forma rápida e muito prática para serem aproveitados como fonte de energia, entretanto, características como o baixo poder calorífico, a alta higroscopicidade, e a grande variabilidade nas dimensões, na umidade, na densidade a granel e no teor de contaminantes, influenciam no aproveitamento energético. Para que os resíduos florestais sejam eficientemente aproveitados para geração de energia essas características devem ser adequadas por meio de processos de conversão.

A fragmentação é um processo físico-mecânico utilizado para ajustar a granulometria dos resíduos florestais, podendo gerar cavacos como produtos. A correta classificação granulométrica dos cavacos permite prever a energia liberada na combustão assim como assegurar o fluxo dos cavacos pelo sistema de alimentação. Cavacos muito grandes impedem o fluxo do material pelo sistema, causando entupimento. Partículas muito finas queimam rapidamente na câmara de combustão, conduzindo a variação de calor e a formação de cinzas.

Para a redução de tamanho dos troncos, galhos, tocos, lascas de madeira e folhas e transformação em cavacos de 25 a 45 mm, são utilizadas máquinas específicas chamadas de picadores. O tamanho dos cavacos é influenciado pelo tipo do picador, a velocidade de avanço dos resíduos x a rotação das facas, o ângulo de corte das facas, a espécie de árvores, ou seja se ela é inteira com ou sem galhos, a presença de contaminantes, a dureza da madeira que influencia diretamente no desgaste das facas e a umidade (LIPPEL, 2019).

Segundo MMA (2009), o aproveitamento energético dos resíduos de madeira pode gerar energia térmica, elétrica ou ambas (co-geração), através de sua combustão direta ou incineração. Podem também ser utilizados para produzir um gás energético por meio do processo de gaseificação. Outra alternativa energética é transformá-los em produtos mais densos, utilizando os processos de briquetagem e peletização, ou transformá-los em carvão utilizando o processo de pirólise.

Outro processo que pode melhorar as características da biomassa é a densificação, processo utilizado para aumentar a densidade da biomassa residual e o briquete um dos produtos resultantes, obtidos pela briquetagem. O briquete (do inglês, *brickets*) é uma estrutura cilíndrica sendo o tamanho final função do equipamento utilizado para tal compactação. Apesar da briquetagem no Brasil não ser amplamente conhecida, a demanda por briquetes no país cresce cerca de 4,4% ao ano, devido à vantajosa substituição dos energéticos pesados como lenha e o carvão vegetal (SOUZA et al. 2017).

A produção de briquetes, a partir da compactação da biomassa residual, traz consigo várias vantagens. Além de ser um combustível renovável que não produz labaredas, os briquetes apresentam uma maior temperatura da chama e produz pouco material particulado. Segundo Quirino (1991), os briquetes possuem no mínimo cinco vezes mais energia que os resíduos florestais que os originaram, sendo que o poder calorífico superior para mais de cem espécies de madeiras brasileiras varia entre 3.350 e 5.260 kcal kg⁻¹ (QUIRINO, 2005).

As tecnologias de queima que usam a biomassa florestal utilizam uma mistura heterogênea e desuniforme quando se analisa a qualidade, composição, de umidade, teor de contaminantes, poder calorífico e densidades. Mesmo existindo muito pouco controle sobre essa biomassa, elas queimam e transformam os resíduos em energia térmica. Melhores resultados poderiam ser atingidos com a qualidade melhorada desse biocombustível. Diante da problemática de destinação e qualidade dos resíduos florestais, o objetivo do trabalho foi caracterizar resíduos florestais in natura de *Eucalyptus grandis* e produzir briquetes desses resíduos, para avaliar a influência da temperatura de aquecimento e da pressão de compactação da máquina sobre as características dos briquetes fabricados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Resíduos madeireiros

Ao longo da sua história, o homem tem feito uso da madeira como matéria prima para fornecer energia, para construir abrigos e ferramentas de trabalho. A madeira é considerada a primeira fonte de energia ligada a tecnologia utilizada pelo homem (LIPPEL, 2019).

A biomassa de origem florestal é a mais utilizada para este fim. Ela se destaca por ter três origens distintas: o material oriundo da colheita florestal, os resíduos que são gerados durante o processamento da madeira e as madeiras originárias de florestas energéticas (LIPPEL, 2019).

O processamento da madeira gera uma grande quantidade de resíduos, que começam a ser produzidos desde o momento da colheita. No Brasil são gerados anualmente 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira, sendo que a principal fonte é a indústria madeireira. Grande parte desses resíduos são gerados durante as operações necessárias para atender o Plano de Manejo Florestal Sustentável, que, no caso das florestas manejadas na Amazônia, chegam a atingir até 5 m³ por cada m³ de madeira retirada da floresta (BIOMASSA E ENERGIA, 2016).

Estudo relatado por Lippel (2019) aponta que as folhas, galhos e ponteiros de árvores representam cerca de 5% da biomassa estimada por hectare, enquanto a biomassa em potencial para combustão representa aproximadamente 90%. O estudo apontou também que cerca de 25% da casca é perdida durante o corte, derrubada, extração, empilhamento e secagem da madeira e que aproximadamente 10% da árvore é deixado para trás na floresta por não ser útil ao mercado madeireiro.

Foelkel (2016) classifica os resíduos florestais em: Resíduos dos processos de industrialização da madeira (cavacos, cascas, serragens, maravalhas, cepilhos, aparas, refilos, produtos desclassificados, páletes, caixotes de embalagens, etc.); e Resíduos dos processos de produção da atividade de silvicultura (galhos, folhas, cascas, tocos/raízes, toretes, toras finas, etc.). Esse autor acrescenta que, além dos resíduos convencionais, novos resíduos da colheita florestal passaram a despertar interesse como fonte de biomassa florestal energética, sendo estes: touças, tocos, cepas e raízes grossas, galhos finos, folhas da copa das árvores e serapilheira ou manta orgânica acumulada sobre a superfície do solo.

Os abundantes resíduos da colheita e do manejo florestal até os anos 80, eram deixados para secar durante 30 a 45 dias e após esse período eram queimados. Mesmo aportando as cinzas, minerais ao solo, estes ficavam sem proteção e a microbiologia era muito impactada. A partir de meados da década de 90, o fogo foi banido enleirando-se os resíduos da colheita nas entrelinhas da floresta. Começaram a ser usados fragmentadores ou picadores de galhos e rolos-facas deixando os fragmentos de forma mais organizada no campo para facilitar as operações culturais seguintes. A permanência desses resíduos no campo, favorecia a ciclagem de seus nutrientes e a conservação da umidade e da microvida do solo. Já no início da década de 2010, passaram a surgir oportunidades para novas utilizações da biomassa florestal, chegando a obter mais de 30 Mg de resíduos florestais por hectare colhido. Uma floresta plantada de eucalipto em brasileira aos 7 anos de idade oferece as seguintes quantidades de biomassa: 150 Mg/ha de madeira de tronco, 10 Mg/ha de casca do tronco, 17 Mg/ha de raízes (cepa ou toco mais raízes grosas), 6 Mg/ha de folhas e 17 Mg/ha de galharia (galhos, ponteiros, árvores finas, toretes descartados). Ou seja, para se produzir 150 Mg de madeira de tronco, a floresta também produz cerca de 50 Mg do que se chama de resíduos potencialmente recuperáveis da colheita florestal (FOELKEL, 2016).

Pontos positivos são destacados quando se usam resíduos florestais, entre eles a valorização de matérias primas que estão sendo descartadas, o uso como combustíveis em centrais termelétricas, fornos, estufas, aquecedores, secadores, etc.; a redução do impacto ambiental causado pelo descarte inapropriado; a valorização pela sociedade da reutilização dos resíduos; muitas vezes o uso energético do resíduo pela própria empresa geradora, representando maior nível de ecoeficiência nas operações industriais e florestais e a eliminação do custo de descarte.

Em contraponto, existem pontos conflitivos como necessidade de fontes complementares de biomassa, para atender o funcionamento de uma central termelétrica, pois geralmente os resíduos gerados por uma unidade de industrialização não costumam ser suficientes. Muitas vezes, os resíduos apresentam qualidade muito precária, com elevada umidade, excessiva contaminação com pedras e terra, baixa densidade aparente, baixo poder calorífico útil e baixíssima densidade energética. Na maioria das vezes, os processos logísticos de manuseio, transporte e estocagem são complexos e onerosos, muito em função da baixa densidade a granel desses tipos de materiais residuais. A estocagem de resíduos é complicada, a menos que os resíduos sejam uniformizados. O desempenho operacional das centrais termelétricas pode sofrer impactos significativos em função da variabilidade na qualidade dos resíduos, presença de contaminantes, suprimento precário e irregular, etc. A

oferta de tecnologias para converter resíduos em produtos energéticos valiosos está em plena evolução, porém existem ainda muitas interrogações em relação ao uso efetivo de tecnologias que exigem níveis de robustez e de continuidade operacional em desempenhos exemplares (FOELKEL, 2016).

Os resíduos madeireiros são considerados matéria orgânica putrescível e são classificados de acordo com a ABNT (2004), como Resíduos Classe II ou não inertes. Os resíduos classificados nessa classe são resíduos que apresentam combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, esses resíduos não oferecem perigo segundo os impactos e riscos que podem causar, mesmo assim quando estes são deixados em aterros e lixões podem causar uma série de problemas, pois se misturam com outros resíduos e reagem química e biologicamente, podendo comprometer a qualidade do meio ambiente.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, contempla as diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos. Ela define resíduos sólidos, como qualquer material, substância, objeto ou bem descartado, resultante de atividades humanas em sociedade, nos estados sólido ou semissólido. A PNRS apresenta como principais objetivos a não geração, redução, reutilização e tratamento de resíduos sólidos; destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos; diminuição do uso dos recursos naturais no processo de produção de novos produtos; intensificação de ações de educação ambiental; aumento da reciclagem no país; promoção da inclusão social e geração de emprego e renda para catadores de materiais recicláveis (BRASIL, 2010).

Essa política governamental proíbe a disposição final dos resíduos de madeira em aterros sanitários, por não serem considerados rejeitos. Perante essa exigência, as indústrias e empresas madeireiras e os municípios brasileiros, responsáveis pela poda e remoção de árvores urbanas, ficam proibidas de dispor seus resíduos em aterros sanitários.

2.2. Alternativas Tecnológicas para o uso dos resíduos florestais

Diante da proibição do envio de resíduos florestais para os aterros sanitários, começou a busca por alternativas para dar fim a esse tipo de resíduos, destacando-se dois grandes destinos principais: como matéria prima para produtos de maior valor agregado e para fins energéticos.

O uso de resíduos florestais como matéria prima para produtos de maior valor agregado compreende desde a fabricação de brinquedos, artefatos de cozinha, a

compostagem, o uso como cama de frango, a fabricação de painéis de madeira tipo aglomerados, MDF, MDP, OSB e chapas duras. Se usados os resíduos para a fabricação de artefatos de cozinha e brinquedos, deve-se ter bastante cuidado com a escolha das espécies a serem usadas, por causa da presença de extrativos, que podem causar sérios problemas à saúde dos usuários (EMBRAPA, 2004).

A produção de adubo orgânico, reaproveitando cascas de toras e serragem, que depois de trituradas e misturadas a dejetos de animais passam por um processo de compostagem, é uma alternativa utilizada pelas empresas madeireiras. O adubo é usado para correção do solo em áreas de reflorestamento, sendo fonte adicional de macro e micronutrientes aos vegetais e reduzindo em 70% o uso de fertilizantes químicos. Em experiência conduzida pela Embrapa (2004), foi concluído que usando essa alternativa empresas conseguem reaproveitar 60% dos resíduos gerados.

Segundo MMA (2009), o aproveitamento energético dos resíduos de madeira pode gerar energia térmica, elétrica ou ambas (co-geração), através de sua combustão direta ou incineração. Podem também ser utilizados para produzir um gás combustível por meio do processo de gaseificação, transformá-los em produtos mais densos, utilizando os processos de briquetagem e peletização, ou transformá-los em carvão vegetal utilizando o processo de pirólise. Foelkel (2016) apresenta outros usos energéticos para os resíduos florestais, como a pirólise rápida para produção de bioóleo; torrefação ou torrificação e a biodeterioração anaeróbica e produção de biogás.

A Combustão Direta e Incineração são práticas comuns em fábricas processadoras de madeira que depende da utilização de vapor. Geralmente este vapor é gerado a partir da queima em caldeira de resíduos de biomassa disponíveis na própria indústria, na forma de cavaco, serragem, resíduos florestais, recortes de painéis, etc. A cogeração de energia é uma possibilidade que existe onde a partir da queima de um único combustível, pode ser produzida eletricidade e energia mecânica para acionamento de mecanismos da própria indústria. A incineração a céu aberto é uma prática comum na região Norte do país como solução para reduzir o acúmulo de resíduos resultantes do processamento primário da madeira.

Dentre as vantagens do uso da Combustão Direta e Incineração são: permite aproveitamento de resíduos gerados na própria unidade fabril; com a utilização de equipamentos adequados, permite o aproveitamento da energia térmica da combustão em outros processos, como a secagem de madeira, geração de energia elétrica, entre outros; há disponibilidade de equipamentos de fabricação nacional com diversas opções de fornecedores e permite o aproveitamento de todos os tipos de resíduo de madeira. Como desvantagens

apresenta, que alguns dos sistemas mais eficientes de geração de energia exigem investimentos elevados, tornando-se inviáveis para a maioria das empresas geradoras de resíduos não capitalizadas; a concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, resultando em elevados custos de frete de equipamentos para comunidades de outras regiões do país; a incineração a céu aberto é uma alternativa poluente e a dificuldade de fiscalização da incineração, tanto em meio rural quanto urbano (MMA, 2009).

A gaseificação de resíduos de madeira produz um gás combustível que pode ser queimado em caldeiras, secadores, câmaras de combustão de motores, turbinas a gás e células combustíveis. Como vantagens da gaseificação está a existência de tecnologias de baixo custo, o que permite atender comunidades isoladas com geradores de eletricidade de pequeno porte; o aproveitamento de resíduos gerados na própria unidade fabril; a geração de energia térmica e elétrica, sem a necessidade de um motor alternativo a vapor ou turbina de condensação; o aproveitamento da energia térmica da combustão em outros processos fabris; a existência de tecnologia nacional disponível no mercado e o de permitir o aproveitamento de todos os tipos de resíduo de madeira. Como desvantagens são apontadas a concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, resultando em elevados custos de frete de equipamentos para comunidades de outras regiões do país; a eficiência do gaseificador é altamente influenciada pela umidade dos resíduos; a tecnologia é mais complexa que a queima direta e o cuidado que se deve ter com o vazamento de gases, que são tóxicos (MMA, 2009).

A Briquetagem e Peletização são uma alternativa para compactar resíduos de madeira, produzindo peletes e briquetes para competir no mercado de energéticos tradicionais como lenha e carvão vegetal. As vantagens do uso dessas tecnologias são a de permitir o aproveitamento de resíduos gerados na própria unidade fabril; menor umidade e custo de transporte que a lenha; existência de tecnologia totalmente nacional disponível no mercado; alto poder calorífico dos produtos; processo de fabricação relativamente simples; possibilidade de exportação do pélete. As desvantagens são a concentração de fabricantes de equipamentos nas regiões Sul e Sudeste, resultando em elevados custos de frete de equipamentos para comunidades de outras regiões do país; exige investimentos em equipamentos desnecessários na combustão direta; a fabricação em comunidades isoladas torna-se inviável devido a custos com transporte do produto final até o mercado consumidor e concorre com a alta oferta de lenha que apresenta menor preço para compra (MMA, 2009).

A pirólise de resíduos de madeira, tais como costaneiras, tocos, madeira de destopo, galhos e troncos de arborização urbana é apropriada para a produção de carvão vegetal para

uso doméstico ou produção de carvão especial (aditivado). Entre as vantagens de usar esta alternativa está a disponibilidade de equipamentos para pirólise, a possibilidade de cogeração aproveitando os gases da pirólise e o grande mercado consumidor do produto. Como desvantagens está a limitação no uso de resíduos para setor siderúrgico devido às especificações de qualidade do carvão; a pirólise em fornos artesanais é poluente pois não há controle do processo nem da emissão de gases tóxicos e é muito difícil a fiscalização de fornos para fabricação do carvão vegetal (MMA, 2009).

2.3. Propriedades dos resíduos florestais

Existem algumas propriedades importantes para avaliar o potencial dos resíduos florestais para uso como energia. A uniformidade da composição, umidade, densidade a granel, poder calorífico útil, densidade energética e teor de contaminantes. Segundo Foelkel (2016) o resíduo florestal deve apresentar uma composição uniforme e tratando-se de um material misto, o ideal é ter as mesmas proporções entre os diversos componentes (madeira, casca, galhos, raízes grossas, etc.). A umidade varia muito dependendo da origem do processo, resíduos como o pó de lixamento de móveis ou de painéis de madeira, são muito secos (10 a 15% de umidade), entretanto, resíduos recolhidos nas áreas de lavagem são muito úmidos. De forma geral, o resíduo para fins energéticos deve apresentar uma baixa umidade, preferencialmente abaixo de 35%.

A densidade a granel deve ser a mais alta possível, ou seja, buscar desenvolvimento de produtos menos volumosos e mais compactados ou densos. O poder calorífico útil dos resíduos é outra propriedade importante e que é muito afetada pela umidade, teor de cinzas e proporção de cascas. A densidade energética é muito influenciada pelo poder calorífico útil, umidade e densidade a granel do resíduo. Os contaminantes são em geral as cinzas presentes na composição do resíduo, uma parte constituída de elementos minerais intrínsecos de sua composição química e outra parte (em geral, maior) resultantes de contaminações desse resíduo com terra, areia e pedras, influenciada pelo manuseio, transporte e estocagem.

Foelkel (2016) elaborou uma tabela comparativa de diferentes propriedades de biomassas florestais com 30% de umidade mostrada no Quadro 1.

QUADRO 1: Diferentes propriedades de biomassas florestais com 30% de umidade (Adaptado de Foelkel, 2016)

Biomassas florestais	Densidade a granel base seca (Mg/m ³)	Densidade a granel a 30% U (Mg/m ³)	Densidade Energética (MJ/m ³)
Lenha de eucalipto 7 anos com casca	0,325	0,464	5.490
Cavacos de eucalipto 7 anos com casca	0,17	0,243	2.877
Cavacos de eucaliptos de plantios adensados 24 meses	0,15	0,214	2.409
Casca de eucaliptos 7 anos	0,13	0,186	1.961
Cavacos de toras de Pinus desbastados	0,13	0,186	2.308
Serragem de eucalipto	0,12	0,171	2.028
Tocos e raízes fragmentadas de eucalipto	0,14	0,200	2.367
Galharia de copa contendo folhas	0,11	0,157	1.974

Em média, as empresas que estão interessadas na exploração do resíduo composto da colheita florestal estão considerando que as características médias desse resíduo misturado podem ser as seguintes: Poder calorífico inferior base peso seco = 17.726 a 17.463.200 MJ/Mg; umidade = 35 a 45%; Poder calorífico útil = 1.900 a 2.900 Mcal/Mg tal qual; Teor de carbono = 44 a 46%; Teor de hidrogênio = 5,5 a 6%; Teor de cinzas = 1,5 a 4%; Densidade a granel = 110 a 150 kg a.s./m³ empilhado ou amontoado (FOELKEL, 2016).

O poder calorífico é uma das principais variáveis usadas para seleção de espécies com melhores características para fins energéticos, uma vez que está relacionada com a quantidade de energia liberada pela madeira durante a sua queima.

Foelkel (2016) após estudo de valores médios em trabalhos de pesquisa apresentou uma relação de PCI base seca de diversas biomassas florestais e resíduos:

- Pó de carvão vegetal de eucalipto = 7.400 Mcal/t a.s.
- Madeira eucalipto sem casca com 7 anos de idade na colheita florestal = 4.400 Mcal/t a.s.
- Madeira de Pinus, contendo casca = 4.500 Mcal/t a.s.
- Casca de eucalipto = 3.900 Mcal/t a.s.
- Madeira de eucalipto contendo casca (material de tronco de árvores com 7 anos) = 4.300 Mcal/t a.s.

- Madeira de eucalipto contendo casca (material de tronco de árvores de plantios adensados com 24 meses de idade) = 4.100 Mcal/t a.s.
- Serragem de eucalipto = 4.350 Mcal/t a.s.
- Tocos/raízes de eucalipto = 4.300 Mcal/t a.s.
- Galharia da copa das árvores de eucalipto, contendo folhas e casca = 4.550 Mcal/t a.s.
- Resíduo de pó de lixamento e de corte de chapas duras de eucalipto = 4.600 Mcal/t a.s.
- Briquetes de eucaliptos = 4.300 Mcal/t a.s.

O teor de cinzas é uma característica química muito importante quando se caracteriza uma biomassa para produção de energia. As cinzas indicam o teor de impurezas presentes na madeira. Teixeira et al. (2016) analisando o teor de cinzas em resíduos de eucalipto determinaram valores de 1,35% e 1,30% em amostras com 7,65% e 12,7% de umidade, respectivamente. Brito e Barrichelo (1978) estudando o teor de cinzas para oito variedades de eucalipto determinaram para a madeira valores que variaram entre 0,30% a 0,53% e, para a casca, valores de 1,34% e 6,4%.

O teor de cinzas apresenta correlação inversa com o poder calorífico. Essa elevada correlação inversa é explicável, visto que a cinza é material de origem mineral, não-orgânico, inerte e não-combustível, e o poder calorífico depende da quantidade de material orgânico presente no combustível (QUIRINO, 1991).

2.4. Fragmentação de resíduos florestais para fabricação de cavacos

Os resíduos florestais costumam possuir alta variabilidade das dimensões e para serem usados como combustível há necessidade de adequação das características físicas, sendo necessária a adequação da granulometria, por meio do processo de fragmentação. A fragmentação é um processo utilizado para homogeneizar resíduos florestais considerando que são provenientes de materiais muito variados. É realizada com o objetivo de produzir partículas menores, que se ajustem melhor uma com as outras e que permitam assim uma facilitação maior do manuseio e transporte desses materiais. Essas partículas uniformizadas serão utilizadas durante a combustão ou em outros processos energéticos. (LIPPEL, 2019)

Lippel (2019) ressalta que o produto da fragmentação é o cavaco, definido como pequenos pedaços de madeira obtidos através da picagem de toras, sobras das serrarias, indústrias moveleiras e da madeira descartada, enfim, de resíduos florestais. Existem três tipos de cavaco de madeira; o tipo I, o cavaco de madeira é feito pela trituração de galhos, folhas, cascas, copas de árvores e até árvores inteiras. Já o tipo II, advém do processo de serralharia da madeira, utilizando de pedaços pequenos de madeira, madeiras tortas, lascas, costaneiras e

outros. Enquanto isso, no tipo III, o cavaco de madeira é formado pelo corte da madeira das árvores. Para sua produção, são utilizados pedaços de madeira, toras sem ramos e folhas.

Os cavacos de madeira apresentam como vantagens que além do uso como combustível, são facilmente armazenados, podendo ser estocados em silos ou em pilhas ao ar livre. Em termos econômicos, o cavaco de madeira possui valor bruto menor do que outro tipo de combustível para caldeiras. É ecologicamente correto, já que utiliza resíduos para sua fabricação (LIPPEL, 2019).

A fragmentação para produção de cavaco é feita com equipamentos denominados picadores. A função dos picadores é processar os resíduos florestais, transformando-os em cavacos. São equipamentos especializados, custosos, robustos e pesados, consumidores de óleo diesel ou eletricidade, necessitam de acionamento humano especializado, exigentes em continuidade operacional e utilização máxima de sua carga. Os picadores demandam manutenção rápida e de transportes de um local para outro (FOELKEL, 2016).

A fragmentação dos resíduos florestais pode ser realizada nas florestas, utilizando picadores móveis e alimentados com óleo diesel, ou nas próprias fábricas, com equipamentos fixos e alimentados por eletricidade. Nas florestas, o fragmentador se move até onde os resíduos estão acumulados e estocados, nas fábricas, são os resíduos que são movimentados até o picador.

Os resíduos fragmentados são acumulados em silo ou carreta, que vai ser transportado diretamente ao consumidor ou para a próxima fase operacional. Em todos os casos, os fragmentos gerados resultam em materiais de baixa densidade a granel (grande volume por unidade de peso seco ou pouco peso seco por unidade de volume de partículas). Os resíduos fragmentados facilitam as operações de manuseio e transporte dos biocombustíveis, sejam elas por via pneumática, por esteiras ou correias, por pás carregadoras, por caçambas, caminhões, trens e até mesmo por navios. As maiores dificuldades costumam acontecer nas florestas, em função das condições locais de clima, acesso, topografia, sequenciamento operacional, etc.

Um parâmetro que caracteriza um cavaco de madeira de boa qualidade é a quantidade de energia que é liberada durante combustão. Entretanto, o tamanho para manter o fluxo contínuo e o conteúdo de umidade que permitirá o armazenamento sem decomposição, também são parâmetros muito importantes a serem considerados. A especificação correta do tamanho é crucial, já que determinadas caldeiras, por exemplo, irão operar de forma mais eficiente com a correta granulometria do material (LIPPEL, 2019).

Segundo Lippel (2019), o tamanho dos cavacos é influenciado pelo tipo do picador, Velocidade de Avanço x Rotação, ângulo de corte das facas, espécie de árvores (inteira com ou sem galhos), presença de contaminantes, dureza da madeira (desgaste maior das facas), umidade. A correta classificação granulométrica dos cavacos permite prever a energia liberada na combustão assim como assegurar o fluxo dos cavacos pelo sistema de alimentação. Cavacos muito grandes impedem o fluxo do material pelo sistema, causando entupimento. Partículas muito finas queimam rapidamente na câmara de combustão, conduzindo a variação de calor e a formação de cinzas.

2.5. Briquetagem de resíduos florestais

Segundo Remade (2016) a densificação pela briquetagem consiste na compactação a elevadas pressões, provocando o aumento da temperatura do resíduo até acima de 250°C. A lignina da madeira, começa a escoar a partir de 170°C, atuando como aglomerante das partículas. Kaliyan e Morey (2009), afirmam que além da lignina as proteínas, gorduras, amidos e carboidratos solúveis também são adesivos naturais da biomassa. A presença destes componentes justifica em muitos casos a não utilização de aglomerantes durante a briquetagem.

Apesar da briquetagem no Brasil não ser muito conhecida, a demanda por briquetes no país cresce devido à vantajosa substituição dos energéticos pesados como lenha e o carvão vegetal (Silberstein, 2011). Para Dantas et al. (2012), a substituição de um outro combustível pelo briquete é vantajosa nas atividades ligadas aos setores alimentícios com grande disponibilidade de resíduos orgânicos resultante em seus processos de produção, sendo nesta área que a produção de briquetes tem mais aplicação.

Pavão e Reis (2017) analisaram a influência da temperatura de aquecimento, o tempo de permanência dos resíduos na matriz e o tempo de estocagem, sobre diferentes características de briquetes de resíduos de poda de árvores urbanas. Observaram a influência dos fatores sobre todas as características analisadas. Os briquetes de resíduos de poda de árvores urbanas não devem ser estocados com elevada umidade relativa do ar, pois as características físicas dos briquetes serão alteradas. Para o tempo de estocagem zero os briquetes com melhores características foram obtidas na temperatura de aquecimento de 140°C e tempo de permanência de 10 minutos. Para os tempos de estocagem de 8 e 15 meses, a temperatura de aquecimento e o tempo de permanência em que se fabricaram os briquetes com melhores características foram de 125°C e 10 minutos, respectivamente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e coleta de resíduos florestais

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

Os resíduos florestais foram coletados na Fazenda Santa Inês, localizada na Rodovia João da Mata Correia (MS-162) Km 35, trecho que liga Dourados a Maracaju, Via Picadinha, no município de Dourados, MS. Os resíduos florestais são resultantes da colheita de plantações de *Eucalyptus Grandis*, com 5 e 10 anos, em 1ª rotação, no espaçamento de 3,0 x 1,5 m.

Os resíduos florestais foram fragmentados para transformação em cavacos, utilizando o picador florestal a disco PDF 150 HDR (Figura 1) da marca Lippel, com potência de 30-90 HP, capacidade de 5 a 15 m³/h sendo acionado pela Tomada de Potência do Trator (TDP).



FIGURA 1. Picador a disco Lippel PDF 150 HDR.

A fragmentação dos resíduos florestais foi conduzida com o intuito de reduzir e uniformizar o material, originando cavacos como mostrado na Figura 2. Os cavacos de resíduos foram estocados em pilhas à intempérie, por um período de 7 dias. O material para avaliação foi retirado desse local e pode ser observado que contêm pedaços heterogêneos, com diferentes granulometrias, cores e texturas.



FIGURA 2. Cavacos obtidos utilizando o picador Lippel PDF 150.

3.2. Caracterização dos resíduos florestais

A quantificação dos componentes dos resíduos foi realizada separando-se as frações referentes a madeira com casca, casca solta, e folha. Foram realizadas 3 repetições desse procedimento.

A determinação da umidade dos resíduos florestais foi realizada de acordo com o Método Padrão da Estufa. Primeiramente a massa do produto úmido foi determinada com uma balança de precisão modelo BL 3200H, com resolução de 0,01 g (Figura 3) e seguidamente se procedeu a secar em uma estufa marca Adamo, com circulação forçada de ar (Figura 4) a 105 ± 1 ° C até a massa estabilizar. Após esse procedimento a massa foi novamente determinada.

A umidade do produto foi calculada utilizando a equação 1.

$$U = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

em que,

U - umidade, %;

M_i - massa inicial da amostra, g;

M_f - massa final da amostra, g.

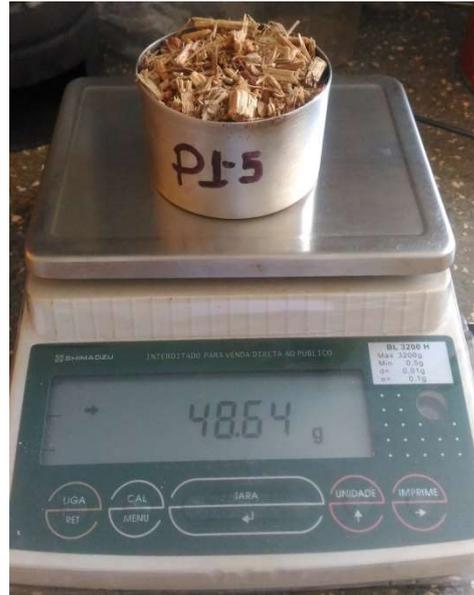


FIGURA 3. Determinação da massa dos resíduos para cálculo da umidade.



FIGURA 4. Estufa utilizada na secagem dos resíduos para determinação de umidade.

A densidade a granel dos resíduos florestais foi determinada analisando o quociente entre a massa do resíduo e o volume do recipiente ocupado pelos mesmos. Usou-se para essa determinação um recipiente metálico cilíndrico, com volume 580,24 cm³. A densidade foi determinada pela equação 2.

$$\rho_g = \frac{m}{V} \quad (2)$$

em que,

ρ_g - densidade a granel dos resíduos, g cm^{-3} ;

m - massa dos resíduos, g;

V - volume do recipiente ocupado pelos resíduos, cm^{-3} .

A densidade energética expressa a quantidade de energia que pode ser obtida por volume de resíduo e foi determinada como o produto do poder calorífico superior e a densidade do resíduo de acordo com a expressão que segue:

$$\rho_E = \text{PCS} \cdot \rho_g \quad (3)$$

em que,

ρ_E - densidade energética do resíduo, J cm^{-3} ;

PCS - poder calorífico superior dos resíduos, J g^{-1} .

O poder calorífico superior dos resíduos utilizado foi o referenciado na literatura. Segundo Teixeira et al. (2016), o poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto é de $18132,5 \text{ J g}^{-1}$ para resíduos com 7,65% de umidade. Soares (2016) determinou poder calorífico dos cavacos de resíduos florestais de 18407 J g^{-1} . Dessa forma foi adotado o valor médio de 18250 J g^{-1} .

O teor de cinzas dos resíduos foi determinado de acordo com a norma ASTM D1102-84 (Standard Test Method for Ash in Wood). As amostras de 1 a 2 g de resíduos florestais foram acondicionadas em recipientes de porcelana e os mesmos colocados em uma mufla microprocessada da marca Adamo 1200°C , pré-aquecida a 600°C (Figura 5) onde permaneceram durante 4 horas, tempo suficiente para que a amostra queime completamente. Após serem retirados da mufla, os cadinhos foram colocados em um dessecador até resfriarem e em seguida pesados com balança de precisão modelo analítica E42B, com resolução de $0,0001 \text{ g}$ (Figura 6). De acordo com a Equação 4 o teor de cinzas foi calculado:

$$\text{CZ} = \frac{M_{\text{cc}} - M_{\text{c}}}{M_{\text{ca}} - M} \times 100 \quad (4)$$

em que,

CZ - teor de cinzas, %;

M_{ca} - massa do cadinho + massa da amostra, g;

Mcc - massa do cadinho + massa de cinzas, g;
Mc - massa do cadinho, g.



FIGURA 5. Recipientes de porcelana acondicionados na mufla para determinação de cinzas.



FIGURA 6. Determinação da massa dos recipientes de porcelana com cinzas em balança analítica, após serem retirados da mufla.

3.3 Densificação dos resíduos florestais

Os briquetes foram fabricados na briquetadora de laboratório LB-32 (Figura 7) que apresenta uma potência de 3,0 hp, com uma matriz de diâmetro 32 mm, e comprimento de

300 mm. A força de compressão máxima do pistão é de 10.000 kg e o acionamento do motor é elétrico. O aquecimento da matriz é realizado por uma resistência elétrica (LIPPEL, 2016).



FIGURA 7. Briquetadora de laboratório LB-32

A matriz da briquetadora foi alimentada em média, com uma massa de resíduos de $39 \pm 0,97$ g (Figura 8).



FIGURA 8. Enchimento da matriz da briquetadora com resíduos florestais.

Para determinar o volume do briquete foi utilizada a expressão do volume de um cilindro, como segue:

$$V_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_o \quad (8)$$

em que,

V_B - volume do briquete, cm^3 ;

D - diâmetro do briquete, cm ;

H_o - altura do briquete, cm .

O diâmetro do briquete foi medido no ponto médio de cada terço da altura da estrutura cilíndrica, sendo essa altura determinada a cada 120 graus da área da base. Foram calculadas as médias dessas dimensões. Para as medições foi utilizado um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm (Figura 9).



FIGURA 9. Determinação da altura e diâmetro dos briquetes

A densidade dos briquetes foi determinada pela equação 9:

$$\rho_M = \frac{M}{V_B} \quad (9)$$

em que,

ρ_M - densidade dos briquetes, g cm^{-3} ;

M - massa do briquete, g .

A massa do briquete foi determinada com uma balança de precisão, modelo BL 3200H, com resolução de 0,01 g.

A densidade energética é o produto da densidade dos briquetes e poder calorífico superior dos briquetes e foram determinados de acordo com a Equação (3).

O índice de contração volumétrica (ICV) foi determinado utilizando-se a Equação 10.

$$ICV = 100 \frac{V_M - V_B}{V_M} \quad (10)$$

em que,

ICV - índice de contração volumétrica, %;

V_M - volume da matriz da briquetadora, cm^3 .

O volume dos resíduos contidos na matriz dos briquetes foi determinado como sendo similar ao de um cilindro e foi determinado pela Equação 11:

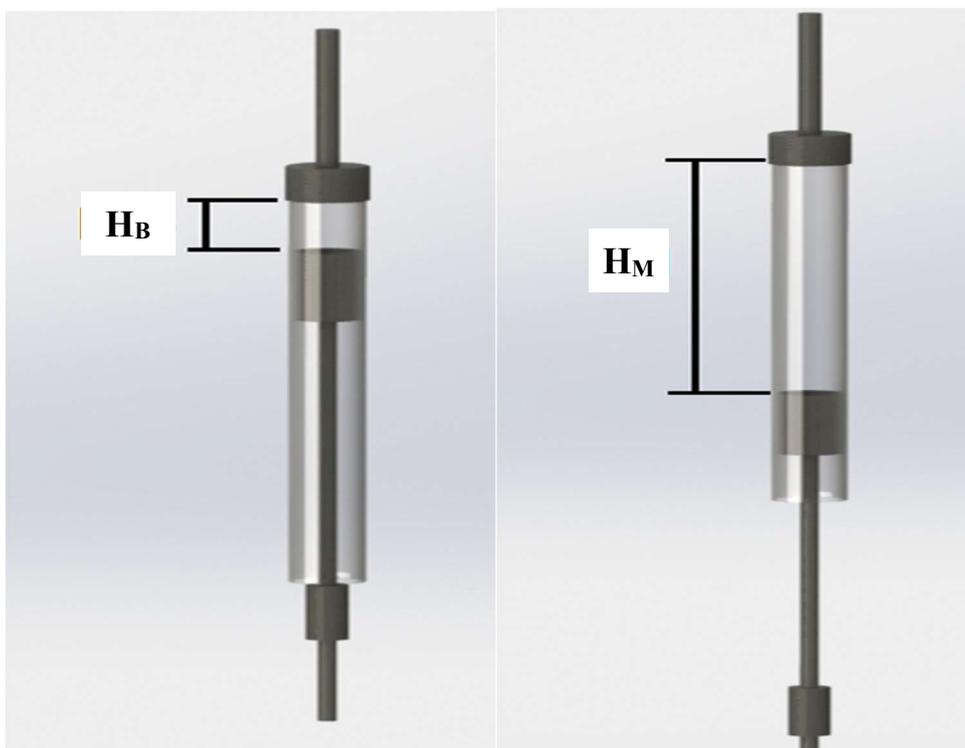
$$V_M = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} H_M \quad (11)$$

em que,

D_M - diâmetro da matriz da briquetadora, cm;

H_M - altura da matriz da briquetadora, cm.

A altura da matriz da briquetadora foi medida quando o pistão de compressão estava no ponto inferior do curso, como representado na Figura 10.



Fonte: ANDRADE & BIGATON (2016).

FIGURA 10. Matriz da briquetadora com pistão no ponto inferior.

3.4. Análises estatísticas

O experimento de densificação foi montado usando o DIC em esquema fatorial 3x4, sendo os tratamentos 3 pressões de compactação (10,34; 13,78 e 17,83 MPa), e 4 temperaturas de aquecimento (80, 110, 125 e 140⁰C), com 3 repetições. O tempo de permanência dos resíduos na matriz foi de 5 minutos.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, utilizando-se o teste F, a 5% de probabilidade. Nos casos em que houveram significância dos tratamentos na análise de variância, as médias foram submetidas a análise de regressão, utilizando-se o teste t, a 5% de probabilidade. Os modelos foram selecionados com base na significância dos coeficientes de regressão e na magnitude do coeficiente de determinação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição dos resíduos florestais analisados corresponde a uma fração de 76,02% de madeira com casca, 16,72% de casca solta e 7,26% de folhas. Pincelli (2011) determinou frações de 74% de madeira com casca e 26% de folhas e casca soltas, quando avaliou a composição de resíduos de eucalipto.

Os resíduos florestais que sejam transformados em cavacos, terão maior valor de mercado e energético se tiverem na sua constituição maiores frações de madeira. Os fragmentos de madeira com casca, cascas soltas e folhas, conferem ao produto menor preço de venda, em função do seu menor poder calorífico, presença de impurezas e menores densidades que pode influenciar diretamente na qualidade da biomassa para queima.

Segundo Foelkel (2016) o resíduo florestal deve apresentar uma composição uniforme e tratando-se de um material misto, o ideal é ter as mesmas proporções entre os diversos componentes (madeira, casca, galhos, raízes grossas etc.). Quando se tratar apenas de cavacos de madeira, é muito importante se especificar os teores máximos de casca e de cinzas que eles possam conter, além da que é crítica para o desempenho energético.

A umidade presente nos resíduos florestais caracterizados foi de 8%. Segundo Foelkel (2016) quanto mais baixo a umidade dos resíduos florestais, melhor será seu aproveitamento energético, preferencialmente esse teor deve estar abaixo de 35%.

A densidade a granel dos resíduos florestais foi de $0,17 \text{ g cm}^{-3}$. Valores entre 0,1 e $0,2 \text{ g cm}^{-3}$ foram apresentados por Foelkel (2016). Pincelli, et al., (2017) quantificando resíduos da colheita do eucalipto, determinaram valores de $0,193 \text{ g cm}^{-3}$. Dessa forma, os resultados de densidade a granel dos resíduos florestais obtidos neste trabalho são similares aos observados em cavacos de eucalipto comerciais. A densidade energética dos resíduos foi de $3102,5 \text{ Jcm}^{-3}$.

O teor de cinzas das amostras de resíduos florestais analisadas foi 0,13%. Teixeira et al. (2016) determinaram em resíduos de eucalipto, valores que variaram entre 1,30 e 1,35% em amostras com 12,7 e 7,65% de umidade, respectivamente. Brito e Barrichelo (1978) estudando o teor de cinzas para oito variedades de eucalipto determinaram para a madeira valores que variaram entre 0,30 a 0,53% e para a casca, valores de 1,34 e 6,4%. Os resíduos florestais apresentam teor de cinzas maior que o da madeira, devido a presença de impurezas de solo, cascas e folhas. Soares (2016) determinou valores de cinzas em cavacos com casca de 0,77%.

Segundo Foelkel (2005), o teor de cinzas da casca é bastante alto. Isso porque a planta acumula minerais na forma de cristais nas células de parênquima, ou os está translocando livres ou adsorvidos na composição de constituintes da seiva orgânica, por isso é

mais interessante que a casca da madeira seja deixada no campo, contribuindo com a nutrição do solo e não aumentando o teor de cinzas de materiais usados para energia.

A casca do eucalipto é um resíduo bastante comum no setor de base florestal. Ela apresenta elevado teor de cinzas, o que a torna um biocombustível não muito energético.

Na Figura 11 observa-se o momento em que o briquete estava sendo retirado da matriz aquecida da briquetadora.



FIGURA 11. Briquete sendo retirado da matriz.

Na Figura 12 são apresentados os briquetes produzidos durante o experimento, correspondendo com os tratamentos estudados. Pode apreciar-se que são corpos cilíndricos bem estruturados, homogêneos e com alturas diferentes.



FIGURA 12. Briquetes produzidos.

Segundo Infoener (2016) é recomendado entre 8 a 15% para que o processo de aglomeração tenha qualidade. Quando existe água no material a compactar, a água evapora devido à altas temperaturas da matriz o que faz formar bolhas de vapor de água, não permitindo que o material se aglomere, provocando até pequenas explosões no momento da retirada do briquete da câmara.

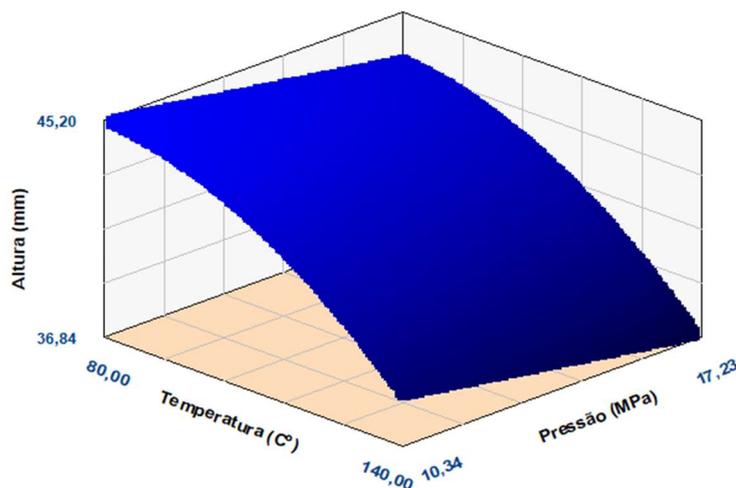
No Quadro 3 é apresentado o resumo da análise de variância das características estudadas, onde se pode observar que o volume, a altura, a densidade, a densidade energética e a contração volumétrica foram influenciadas pela pressão de compactação e pela temperatura de aquecimento. Observa-se também a interação dos dois fatores estudados, demonstrando que a pressão de compactação e a temperatura de aquecimento influenciam conjuntamente durante o processo de fabricação dos briquetes. O diâmetro dos briquetes teve influência apenas da temperatura de aquecimento e da interação entre temperatura e pressão, não sendo significativo o efeito isolado da pressão.

QUADRO 3. Resumo da análise de variância dos dados de massa, volume, altura, diâmetro, densidade, contração volumétrica e densidade energética

Fator de Variação	GL	Quadrado médio					
		Volume	Altura	Diâmetro	Densidade	Contração Volumétrica	Densidade energética
Pressão (P)	2	7,8725**	10,2757**	0,0266	0,0064**	1,5524**	2130118**
Temperatura (T)	3	79,9782**	71,8748**	1,1915**	0,0849**	15,771**	27918630**
T × P	6	2,1105**	1,9049**	0,0396**	0,0036**	0,4162**	1184622**
Resíduo	24	0,1749	0,1415	0,0104	0,0008	0,0344	272016
CV	-	1,27	0,91	0,32	2,38	0,21	2,38

** e * Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F. GL - graus de liberdade.

O comportamento da altura do briquete em função da pressão de compactação e temperatura de aquecimento foi representado na Figura 13. Os maiores e menores valores para essa característica foram de 45,21 e 36,86 mm respectivamente. O modelo selecionado para a altura demonstra uma dependência linear da pressão de compactação e uma dependência quadrática da temperatura de aquecimento, onde 92% dos dados experimentais da altura conseguem ser explicados com esse modelo.



$$A = 39,1822 - 0,26399 * P + 0,23419 * T - 0,001559 * T^2 \quad R^2 = 0,92$$

FIGURA 13. Altura dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e pressão de compactação. *Significativo a 1%, pelo teste t.

Os briquetes com maior altura foram produzidos na menor temperatura de aquecimento (80°C) e na menor pressão de compactação (10,34 MPa). Contrariamente os de menor altura foram produzidos na maior temperatura de aquecimento (140°C) e na maior menor pressão de compactação (10,34MPa). Resultados similares foram obtidos por Pavão e Reis (2017) quando avaliaram a influência da temperatura em resíduos de poda de árvores urbanas.

Esse comportamento pode ter acontecido pelo fato da lignina, considerada o aglomerante natural dos resíduos lignocelulósicos, à menor temperatura (80°C) não ter plastificado ainda. Até os resíduos alcançarem a temperatura de 100°C, em que ocorre a lignificação, são as gorduras, as proteínas, os carboidratos solúveis e os amidos quem têm a função de aglomerante, por serem considerados adesivos naturais como afirmado por Kaliyan e Morey (2009).

Na medida em que aumenta a temperatura de aquecimento o processo de plastificação da lignina pode estar acontecendo com maior intensidade e conseqüentemente os resíduos ficam aglomerados com melhor qualidade, conseqüentemente a altura dos briquetes diminui na medida em que aumenta a temperatura de aquecimento e a pressão de compactação.

Na medida que aumenta a pressão de compactação, aumenta a força aplicada na área circular que fica abaixo do pistão, conseqüentemente menores alturas resultam nos briquetes fabricados com maiores pressões.

O comportamento do diâmetro do briquete em função da temperatura de aquecimento foi representado na Figura 14. Os maiores e menores valores para essa característica foram de 32,22 e 31,48 mm respectivamente.

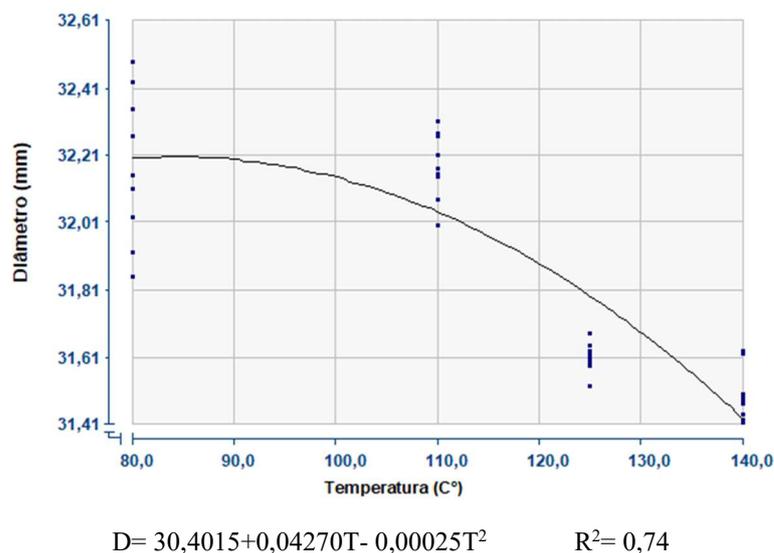


FIGURA 14. Diâmetro dos briquetes em função da temperatura de aquecimento. *Significativo a 1%, pelo teste t.

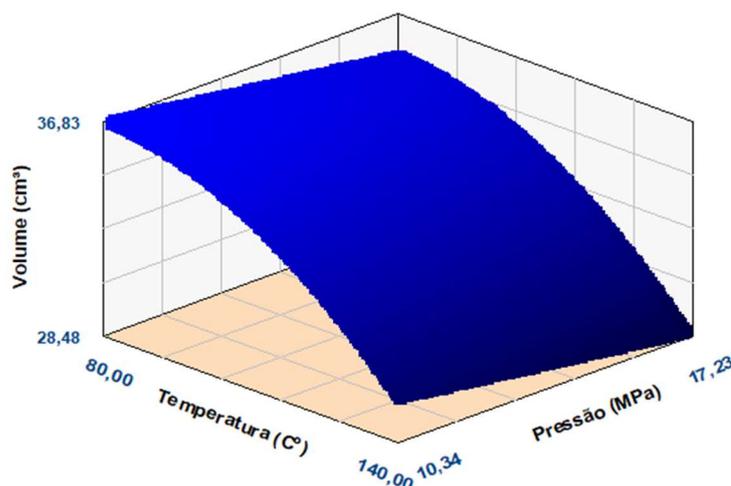
O modelo selecionado para o diâmetro demonstra que a pressão de compactação não influenciou diretamente no diâmetro do briquete produzido, somente a temperatura de aquecimento. Embora tenha havido interação significativa entre os dois fatores, não se ajustou modelo representativo da pressão, sendo selecionado um modelo quadrático da temperatura.

Como o diâmetro do briquete é pré-estabelecido pela matriz da briquetadora, esta não permite variação. Mesmo quando o briquete é retirado, não acontece expansão do diâmetro o que constata as fortes ligações das moléculas de lignina do eucalipto.

Andrade e Bigaton (2016) avaliando briquetes de bagaço de cana de açúcar observaram aumento do diâmetro, constatando que a expansão acontece quando o briquete é retirado da matriz. Esses autores afirmaram que entre as possíveis causas poderiam estar a menor ligação das moléculas de lignina do bagaço e a diferença de pressão a que os resíduos estão expostos durante a briquetagem (2000 PSI=136 atm) e quando são tirados da matriz, ficando sob a pressão atmosférica (1 atm).

O comportamento do volume do briquete em função da pressão de compactação e temperatura de aquecimento foi representado na Figura 15. Os menores e maiores valores para essa característica foram de 28,50 e 36,84 cm³ respectivamente. O modelo selecionado

para o volume demonstra uma dependência linear da pressão de compactação e uma dependência quadrática da temperatura de aquecimento, em que 89% dos dados experimentais da altura conseguem ser explicados com esse modelo.

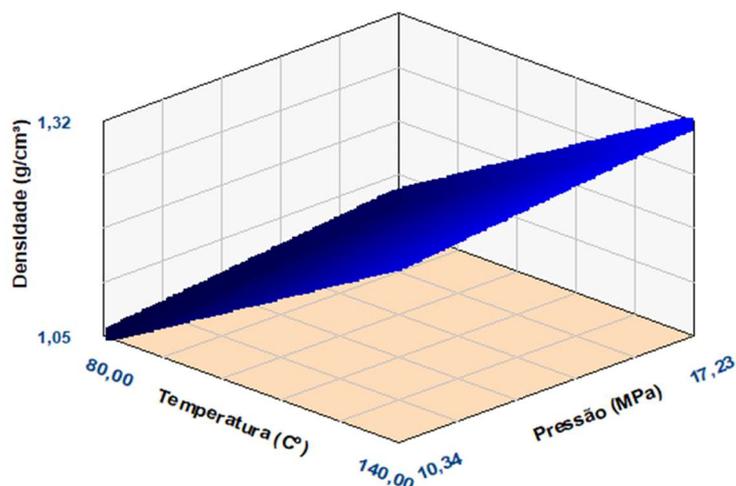


$$V_B = 28,9226 - 0,22575P + 0,26609T - 0,001724T^2 \quad R^2 = 0,89$$

FIGURA 15. Volume dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e pressão de compactação. *Significativo a 1%, pelo teste t.

O volume é uma característica que depende diretamente da área e da altura dos briquetes. Como a altura foi influenciada pelas variáveis estudadas, consequentemente o volume também é influenciado. A lignina e os extrativos presentes nos resíduos de eucalipto atuam como um agente termoplástico, aumentando a força de ligação química entre as partículas e favorecendo a diminuição do volume. O volume é uma característica muito importante para analisar as operações de transporte, estoque e manuseio dos briquetes.

A Figura 16 mostra a análise da densidade aparente dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e da pressão de compactação, podendo observar a dependência linear desses fatores. Os maiores e menores valores para a densidade aparente do briquete foram de 1,32 e 1,015 g cm⁻³ respectivamente. O modelo selecionado demonstra que 82% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelo modelo.



$$\rho = 0,69838 + 0,0061677P + 0,00371T$$

$$R^2 = 0,82$$

FIGURA 16. Densidade dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e pressão de compactação. *Significativo a 1%, pelo teste t.

Souza e Vale (2016) determinaram a densidade aparente de briquetes fabricados com seis tipos de biomassas, em função da temperatura de aquecimento (130 e 200°C) e a pressão de compactação (8 e 12 MPa). Os valores variaram entre 1 e 1,3 g cm⁻³.

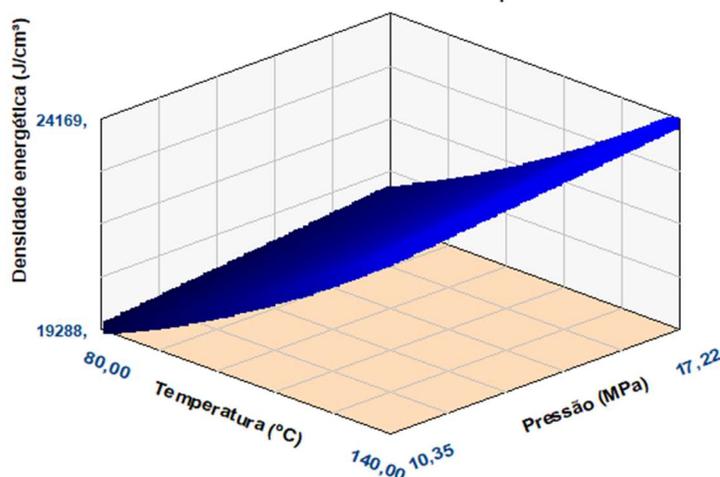
Pavão e Reis (2017) determinaram valores de densidade aparente para briquetes de poda de árvores, entre 1,04 e 1,23 g/cm³. Esses autores durante o processo de fabricação analisaram a influência da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência do resíduo na matriz.

Os briquetes produzidos na menor temperatura e na menor pressão de compactação, apresentaram menor densidade aparente. Este fato pode estar relacionado a um não arranjo total das partículas, ou seja, não houve a total lignificação dos resíduos para a temperatura menor, pois apenas alguns compostos atuam como ligantes a essa temperatura.

A densidade aparente dos briquetes é maior, na medida que aumentam as temperaturas de aquecimento da matriz e a pressão de compactação. A densidade aparente é um fator muito importante quando se estuda a viabilidade de uma biomassa para bioenergia, pois maiores densidades indicam mais massa disponível para um mesmo volume e conseqüentemente maior densidade energética.

A Figura 17 mostra a análise da densidade energética dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e da pressão de compactação. O modelo selecionado para a densidade energética demonstra uma dependência linear da pressão de compactação e uma dependência quadrática da temperatura de aquecimento. Os menores e maiores valores para

essa característica foram de 19.287 e 24.166 J cm⁻³ respectivamente. O modelo selecionado demonstra que 84% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelo modelo.



$$\rho E = 16137,7 + 111,837P + 0,31146T^2 \quad R^2 = 0,84$$

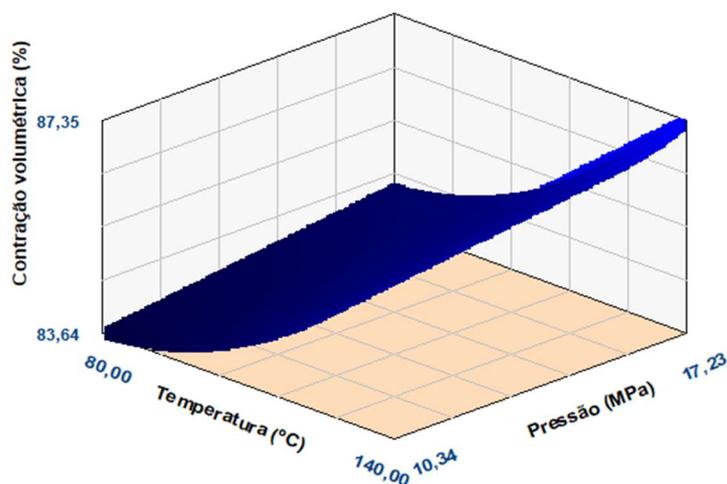
FIGURA 17. Densidade Energética dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e pressão de compactação. *Significativo a 1%, pelo teste t.

Observa-se que os briquetes produzidos com a menor temperatura e menor pressão de compactação possuem menor densidade energética. A densidade energética é proporcional à densidade aparente dos briquetes. Nas menores temperaturas, os valores de densidade aparente são menores, o que interfere diretamente na densidade energética. A densidade energética caracteriza quanta energia tem uma unidade de volume do briquete. Quanto maior essa característica maior o potencial desse biocombustível.

Valores de densidade energética entre 12.500 e 19.500 J cm⁻³ foram determinados por Souza e Vale (2016) para briquetes fabricados com seis tipos de biomassas, entre elas madeiras e resíduos agrícolas. Pavão e Reis (2017) encontraram valores entre 22.011 e 26.181 J/cm³ para briquetes de poda de árvores e Andrade de Bigaton (2016) determinaram valores entre 13.202,7 e 17.146 J cm⁻³ para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar.

O Índice de contração volumétrica representa a capacidade dos resíduos que se encontram na matriz de se contrair para formar o briquete. Essa característica representa a relação entre o volume ocupado pelo resíduo na matriz da briquetadora e o volume desse mesmo resíduo após a briquetagem. A Figura 18 representa o comportamento do Índice de contração volumétrica do briquete em função da temperatura de aquecimento e da pressão de compactação. O índice de contração volumétrica apresentou maiores e menores valores de 87,23 e 83,60% respectivamente, o que permitiu produzir um briquete 6 a 7 vezes menor. O modelo selecionado demonstra uma dependência linear da pressão e quadrática para a

temperatura, onde 89% dos dados experimentais do índice de contração volumétrica consegue ser explicados.



$$\text{ICV} = 87,1563 + 0,10025P - 0,11816T + 0,00076T^2 \quad R^2 = 0,89$$

FIGURA 18. Índice de Contração Volumétrica em função da temperatura de aquecimento e pressão de compactação. *Significativo a 1%, pelo teste t.

Andrade e Bigaton (2016) analisando o índice de contração volumétrica em briquetes de bagaço de cana de açúcar concluíram que foi influenciado pela temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, indicando que o resíduo se contrai até 86,79% quando fabricado a temperaturas de 140°C. Esses mesmos autores relatam que a compressão ocorrida no experimento resulta em briquetes com volume de 5 a 8 vezes menores que o da matriz da briquetadora. Para Dias et al. (2012), essa compactação pode ser 4 a 6 vezes menor.

Pavão e Reis (2017) estudando a contração dos resíduos dentro da matriz, concluíram que na medida em que aumenta a temperatura de aquecimento e o tempo de permanência dos resíduos na matriz, aumentou a capacidade do briquete de poda de árvores de se contrair, em que para os tratamentos estudados houve compressão de até 85,31%.

Diaz e Albuquerque (2018) analisando a contração volumétrica dos resíduos de coco determinaram valores de 83,6, 83,8 e 87,9% para as temperaturas de aquecimento da matriz de 80, 110 e 140°C, respectivamente, indicando a relação diretamente proporcional entre a temperatura e o índice. Esses autores concluíram que a compressão ocorrida no experimento resultou em briquetes com volume de 6 vezes menores que o da matriz da briquetadora. Flores (2009) conseguiu uma redução de até dez vezes para briquetes de braquiária.

A temperatura de aquecimento e a pressão de compactação foram fatores importantes na contração volumétrica dos briquetes, pois na medida que essas variáveis aumentaram, aumentou a capacidade do briquete de se contrair. Um briquete mais compacto indica que houve um melhor arranjo das partículas de resíduos e menor quantidade de poros entre elas. Para as menores temperaturas e menores pressões de compactação, ocorre o processo inverso.

5. CONCLUSÃO

As características dos resíduos florestais obtidos no campo indicaram que estão aptos para serem densificados.

A temperatura de aquecimento e a pressão de compactação influenciaram diretamente nas características estudadas dos briquetes de resíduos florestais, exceto o diâmetro que depende da temperatura na faixa estudada.

Maiores temperaturas e maiores pressões de compactação permitem a formação de um briquete com menor altura, menor diâmetro, menor volume, maior densidade energética e maior índice de contração volumétrica.

Os modelos ajustados foram capazes de prever os comportamentos das características avaliadas dos briquetes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Resíduos Sólidos- Classificação. 71p. 2004
- ANDRADE, L. F. F.; BIGATON, R. P. Briquetagem de bagaço de cana-de-açúcar. **Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola)**. Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, 2016.
- BARROS, V.C.C. **Briquetes produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas**. 44p. Monografia - Universidade Federal de Viçosa. 2013.
- BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; ZWART, R.; KIEL, J. et al. **Torrefaction for biomass cofiring in existing coal-fired power stations - biocoall**. Report ECN-C-05-013. Petten, The Netherlands, 2005.
- BIOMASSA & ENERGIA. **Os resíduos de madeira gerados anualmente no Brasil são estimados em 30 milhões de toneladas**. 2016. <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes/20160211-103419-x618>. Acesso em 02/10/2019.
- BORGHI, M.M. **Efeito da granulometria na avaliação dos briquetes**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória -ES, 2012.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm Acesso em: 03 junho de 2019.
- BRITO, J.O. e BARRICHELO, L.E.G. **Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF n.16, p.63-70, 1978. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf>.
- CARNEIRO, A.C.O, et al. **Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos**. Rev. Árvore vol.38 no.2 Viçosa Mar./Apr. 2014
- DANTAS, A.P.; SANTOS, R.R. e SOUZA, S.C. **O briquete como combustível alternativo para a produção de energia**. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia, 1-5p. 2012.
- DIAS, J.M.C.S.; SANTOS, D.T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e pêletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília - DF: Embrapa Agroenergia, 2012.
- DIAZ, A.D.L; ALBUQUERQUE, C.F. **Caracterização, densificação e torrefação de resíduos de coco-da-baía (Cocos nucifera L.)** Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS, 2018.

EMBRAPA. **Aproveitamento de Resíduos de Madeira em Três Empresas Madeireiras do Estado do Pará.** Comunicado Técnico 102. Belém: 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/395422/1/com.tec.102.pdf>. Acesso em: 06 de outubro 2019.

FLORES, W. P. **Redução do volume de biomassa no processo de briquetagem.** Revista da Madeira. Curitiba - PR, ano 20, n. 121, p. 32-34, 2009.

FOELKEL, C. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade.** In Resíduos Florestais Energéticos. Eucalyptus on-line Book e Newsletter. 2016.

FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto.** 109 p. Disponível em: http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf. Acesso em: 09/11/2019.

KALIYAN N.; MOREY R.V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products.** Biomass and Bioenergy, v.33, n. 3, p. 337-359, mar. 2009.

LIPPEL. **Qualidade dos cavacos.** Disponível em: <http://www.lippel.com.br/>. Acesso em: 18de maio de 2019.

LIPPEL. **Resíduos Florestais: Um grande potencial para geração de energia.** Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/noticias/residuos-florestais-um-grande-potencial-para-geracao-de-energia-39.html>. Acesso em: 04 outubro de 2019.

MMA - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos.** 2009. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf. Acesso em: 03 de outubro 2019.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2003. 199p.

PAVÃO, L.R. e REIS, R.B. **Caracterização de briquetes de resíduos de poda de árvores urbanas.** Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, 2017.

PINCELLI, A.L.S.M.; MOURA, L.F. e BRITO, J.O. **Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de Eucalyptus grandis e Pinus caribaea var. hondurensis.** Scientia Forestalis. Piracicaba, v.45, n.115. 2017.

PINCELLI, A.L.P.M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética.** USP: Tese, 2011. 126p.

QUIRINO, W.F. **Briquetagem de resíduos Ligno-Celulósicos.** IBAMA/LPF. Brasília. 2005.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Brasília: LPF/IBAMA, 1991. 18p. (Série Técnica, 13).

QUIRINO, W.F. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira** nº 89, 2005, 6p. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-46poder-calorifico-da-madeira-e-de-materiais-ligno-celulosicos.pdf>.

REMADE. **Biomassa.** Disponível em: http://www.remade.com.br/br/madeira_energia.php?num=3&title=Biomassa. Acesso em: 02 de setembro de 2019.

SILBERSTEIN, E. UnB mapeia matérias primas para a fabricação de briquetes. **UnB Ciência**. 19 dez. 2011. Disponível in: <http://www.unbciencia.unb.br>. Acesso: 03 setembro de 2019.

SOARES, J.M. **Avaliação da qualidade de três diferentes tipos de cavacos de madeira do híbrido Eucalyptus urophila x grandis**. UFPR, Trabalho de Conclusão de Curso. 2016. 47p. Disponível em: <http://www.engenhariaflorestal.ufpr.br/engflorestalcoord/tcc/037%20-%20JESSICA%20MACHADO%20SOARES.pdf>

SOUZA, F. & VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v.36, n.88. 2016

SOUZA, G. H. R.; PANDOLFI, M. A. C.; COIMBRA, C. C. O mercado potencial do uso de briquetes no Brasil. **VI Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga**. Taquaritinga – SP, 2017.

TEIXEIRA, C.M.; MARTINS, M.P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W; YAMAJI, F.M. Caracterização Química de Resíduos de Eucalyptus sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia. **Revista Virtual Química**. V.8, No. 5. 2016.

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para geração de energia. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro - RJ, v. 33, p. 261-314, 2011.