

Efeito do Tamanho de Partícula e Modo de Prensagem de Sorgo Biomassa para a Produção de Energia Térmica



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura e Pecuária**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
250**

**Efeito do Tamanho de Partícula e Modo
de Prensagem de Sorgo Biomassa para
a Produção de Energia Térmica**

*Evandro Chartuni Mantovani
Maria Lúcia Ferreira Simeone
Antônio Carlos de Oliveira
Rafael Augusto da Costa Parrella*

Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2023

Embrapa Milho e Sorgo
Rod. MG 424, Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente
Maria Marta Pastina

Secretária-Executiva
Elena Charlotte Landau

Membros
Cláudia Teixeira Guimarães, Mônica Matoso Campanha, Roberto dos Santos Trindade, Maria Cristina Dias Paes.

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro (CRB-6/2749)

Tratamento das ilustrações
Márcio Augusto Pereira do Nascimento

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Márcio Augusto Pereira do Nascimento

Foto da capa
Evandro Chartuni Mantovani

1ª edição
Publicação digital (2023): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Milho e Sorgo

Efeito do tamanho de partícula e modo de prensagem de sorgo biomassa para a produção de energia térmica / Evandro Chartuni Mantovani ... [et al.]. – Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2023.

PDF (18 p.) : il. color. – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154 ; 250)

1. *Sorghum bicolor*. 2. Compactação. 3. Forragem. I. Mantovani, Evandro Chartuni. II. Simeone, Maria Lúcia Ferreira. III. Oliveira, Antônio Carlos de. IV. Parrella, Rafael Augusto da Costa. V. Série.

CDD (21.ed.) 633.174

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução.....	8
Material e Métodos.....	10
Resultados e Discussão	12
Conclusões.....	15
Agradecimentos.....	15
Referências.....	16

Efeito do Tamanho de Partícula e Modo de Prensagem de Sorgo Biomassa para a Produção de Energia Térmica

Evandro Chartuni Mantovani¹

Maria Lúcia Ferreira Simeone²

Antônio Carlos de Oliveira³

Rafael Augusto da Costa Parrella⁴

Resumo - No processo de fabricação dos pellets/briquetes há várias biomassas que já estão em uso, como casca de café, serragem de eucalipto e resíduos da colheita do milho, atendendo a uma escala menor de consumo. Entretanto, para utilização de biomassa em uma escala intermediária de consumo, será exigido um atendimento de matéria-prima em quantidade/escala e densidade energética um pouco maior, visando a queima em fornos industriais. Atualmente, uma das alternativas mais promissoras para o fornecimento de matéria-prima para queima direta é o sorgo biomassa, com um ciclo curto entre 150 a 180 dias, com a vantagem de ser propagado por sementes e permitir total mecanização de seus processos de produção. Dadas as suas características físicas, químicas, propriedades térmicas, facilidade de combustão, baixa umidade e alta densidade, os briquetes de biomassa representam uma forma atrativa de biocombustível para aplicações de aquecimento e geração de eletricidade. O objetivo deste trabalho foi estabelecer as condições de prensagem da forragem de sorgo biomassa BRS 716 para a produção de briquetes utilizando uma prensa hidráulica manual. O experimento foi conduzido no Laboratório de Mecanização da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, utilizando-se de uma prensa hidráulica, para a fabricação dos briquetes de sorgo biomassa. Foi utilizado o delineamento experimental completamente casualizado com quatro

¹ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agricultura de Precisão, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

² Química, doutora em Química, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

³ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

⁴ Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

repetições. Os tratamentos, arranjados em um fatorial 2 x 2, foram constituídos por dois tamanhos de partícula da biomassa (4 mm e 8 mm) e dois modos de prensagem: a) uma prensagem com o cilindro totalmente abastecido com a biomassa (Cheio); e b) duas prensagens, sendo uma com biomassa na metade do cilindro e outra após o enchimento completo (Meio+Meio). Os resultados mostraram que, de modo geral, as características físico-químicas analisadas foram afetadas significativamente pelo modo de prensagem e pelo tamanho de partícula dos briquetes. Para o caso específico da densidade energética, o valor médio obtido com a prensagem após o cilindro cheio superou, significativamente, o valor obtido com a prensagem em duas etapas (meio cilindro e cilindro cheio), quando foram utilizadas partículas de 4 mm, mas não houve diferença significativa entre os dois modos de prensagem, para caso de partículas com 8 mm. Os tamanhos de partícula não diferiram quando foi utilizada a prensagem com cilindro cheio, mas para prensagem em duas etapas o valor médio da densidade energética, para partículas de 8 mm, superou, significativamente, a média apresentada pelos briquetes de 4 mm. Os briquetes apresentaram densidade aparente de até $390,70 \text{ kg.m}^{-3}$, valores comparativamente quatro vezes às biomassas das plantas (gramíneas).

Termos para indexação: briquetes, biomassa, prensa hidráulica, tamanho de forragem, densidade energética.

Effect of Particle Size and Pressing Method of Sorghum Biomass for Thermal Energy Production

Abstract - In the pellet/briquette manufacturing process there is the use of several biomasses, such as coffee husks, eucalyptus sawdust and residues from the corn harvest, serving a smaller scale of consumption. However, for the use of biomass on an intermediate scale of consumption, it will require a supply of raw material, in quantity/scale and energy density a little higher, aiming at burning in industrial furnaces. Currently, one of the most promising alternatives for the supply of raw material for direct burning is biomass sorghum, with a short cycle between 150 days and 180 days, with the advantage of being cultivated using seeds and allowing full mechanization of its production processes. Given their physical, chemical and thermal properties, ease of combustion, low humidity and high density, biomass briquettes represent an attractive form of biofuel for heating and electricity generation applications. The objective of this work was to establish the conditions for pressing sorghum biomass BRS 716 forage for the production of briquettes using a manual hydraulic press. The experiment was carried out at the Mechanization Laboratory of Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil), using a hydraulic press to manufacture biomass sorghum briquettes. The statistical design used for testing the production of briquettes in the hydraulic press was a factorial, with four replications for the following treatments, with two forage particle sizes: 4 mm and 8 mm and two layers of forage feed from the pressing cylinder. The results obtained by the statistical analysis indicate that the pressing method and the particle size caused significant differences in the analyzed properties. The particle size for the production of briquettes did not influence the energy density, however, the way of filling the cylinder influenced the result, and the highest energy density and the lowest ash content were obtained with the particle size of 4 mm and with the full cylinder, but for the 8 mm size, there was no significant difference. The biomass sorghum briquettes obtained in the hydraulic press provided apparent density of up to $390.70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, comparatively values from four times the biomass of the plants (grasses).

Index terms: briquettes, biomass, hydraulic press, forage size, energy density.

Introdução

O sorgo biomassa pode ser utilizado de várias maneiras para produção de energia térmica, desde o uso da forragem diretamente para queima nas caldeiras ou com grandes fardos colhidos mecanicamente, e até mesmo em tamanhos menores, como os pellets. No processo de fabricação dos pellets, há várias biomassas que já estão em uso, como casca de café, serragem de eucalipto e resíduos da colheita do milho, atendendo a uma escala menor de consumo, como padarias, restaurantes, pizzarias, secadores, etc., que utilizam fornos menores para queima do material. Entretanto, a utilização de biomassa em uma escala intermediária de consumo exigirá um atendimento de matéria-prima em quantidade/escala e densidade energética maiores, visando a queima em fornos industriais.

Atualmente, uma das alternativas mais promissoras para o fornecimento de matéria-prima para queima direta é o sorgo biomassa, com um ciclo curto, entre 150 dias e 180 dias, e a vantagem de ser propagado por sementes e permitir total mecanização de seus processos de produção (Mantovani; May, 2015).

Estudos realizados por Mantovani et al. (2019) mostram que a forragem de sorgo biomassa colhida e armazenada no chão, com e sem revolvimento da massa de sorgo, a partir dos 14 dias, atinge o teor de matéria seca de 50% e poder calorífico de 10.000 J g^{-1} . De acordo com Burin et al. (2015), esses valores são superiores ao bagaço de cana-de-açúcar, que apresenta matéria seca de 50% e poder calorífico de 7.162 J g^{-1} , em decorrência da perda de extrativos durante o processo de prensagem para retirada do caldo.

A densidade aparente também deve ser considerada na avaliação da biomassa para a produção de bioenergia, pois maiores densidades indicam maior massa disponível para um mesmo volume considerado e, portanto, maior densidade energética (Brand, 2010). Couto et al. (2004) relataram que a baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação com o petróleo e o carvão mineral, resulta em custos elevados de processamento, transporte e armazenamento.

Assim, o desenvolvimento contínuo de técnicas para aumentar a concentração de energia ampliará o espectro de utilização da biomassa na

transformação energética. As técnicas de densificação da biomassa, como a briquetagem, técnica pela qual é possível obter incrementos na densidade aparente, contribuem de forma significativa para um aumento na quantidade de energia por unidade de volume.

Dadas as suas características físicas, químicas, propriedades térmicas, facilidade de combustão, baixa umidade e alta densidade, os briquetes de biomassa representam uma forma atrativa de biocombustível para aplicações de aquecimento e geração de eletricidade (Tumuluru; Fillerup, 2020).

O tamanho de partícula também causa alterações no processo de densificação da biomassa, pois a redução e a homogeneização das partículas permitem melhor compactação da matéria-prima, influenciando suas características físicas, mecânicas e o consumo de energia para a fabricação dos briquetes (Francik et al., 2020). As biomassas à base de plantas (gramíneas) têm baixa densidade aparente, variando de 50 kg m^{-3} a 130 kg m^{-3} , dependendo da espécie de planta, do tamanho e da distribuição do tamanho de partículas. Por outro lado, a biomassa densificada em pellets ou briquetes proporciona um aumento na densidade aparente para valores entre 320 kg m^{-3} e 700 kg m^{-3} (Sokhansanj; Turhollow, 2004).

A produção de briquetes pode ser realizada em processos automatizados de grande escala (Kumar; Chandrashekar, 2020), ou manualmente por meio de prensas hidráulicas ou dispositivos mecânicos manuais (Aransiola et al., 2019; Morales-Máximo et al., 2020; Kunh, 2022).

O objetivo deste trabalho foi estabelecer as condições de prensagem da forragem de sorgo biomassa BRS 716 para a produção de briquetes utilizando uma prensa hidráulica manual.

Os resultados deste trabalho contribuem para o atendimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 - “Energia limpa e acessível”, visando à utilização de sorgo biomassa para a produção de energia térmica, estando especificamente alinhado com as metas a seguir: 7.2: “Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global”; 7.3: “Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética” e 7.4: “Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo

energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, além de promover o investimento em infraestrutura de energias, limpas”.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Mecanização da Embrapa Milho e Sorgo, utilizando-se uma prensa hidráulica, modelo Versa Tester, marca Soil Test, para a fabricação dos briquetes de sorgo biomassa (Figura 1A e 1B). Foi utilizado na prensa um cilindro de aço carbono com 11,5 cm de altura e 16 cm de diâmetro.

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani



Figura 1. Prensa hidráulica com o cilindro que recebeu a biomassa para produção dos briquetes.

A biomassa foi triturada por uma ensiladeira Nogueira, modelo EM-6400, com regulagem do tamanho do material picado (4 mm e 8 mm), e armazenada em sacos plásticos de 1 kg, para posterior alimentação do cilindro.

Ensaio preliminares com a forragem triturada recém-colhida não produziram resultados satisfatórios para a produção dos briquetes, em função

da alta umidade do material (Figura 2A), e por isso não seguiu adiante com os testes no material recém-colhido.

Para a diminuição da umidade, a biomassa foi seca por 14 dias ao ar livre conforme Mantovani et al. (2019). A secagem da biomassa ao ar livre por duas semanas possibilita a obtenção da forragem com 50% de umidade e 10.000 J g^{-1} de poder calorífico, e ao final do processo de prensagem, a obtenção do briquete (Figura 2B).

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani



Figura 2. Sorgo biomassa BRS 716 com alta umidade (A) e material seco (B) após prensagem de 134 kN.

Foi utilizado o delineamento experimental completamente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos, arranjados em um fatorial 2×2 , foram constituídos por dois tamanhos de partícula da biomassa (4 mm e 8 mm) e dois modos de prensagem: a) uma prensagem com o cilindro totalmente abastecido com a biomassa (Cheio); b) duas prensagens, sendo uma com biomassa na metade do cilindro e outra após o enchimento completo (Meio+Meio).

Para a produção dos briquetes na prensa hidráulica utilizou-se uma pressão de 134 kN. A caracterização físico-química foi realizada pela análise da composição química da biomassa para os teores de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas (%), determinação da umidade (%), determinação do poder

calorífico (MJ kg^{-1}), conforme metodologias descritas por Simeone et al. (2018).

A densidade aparente dos cubos de biomassa (kg m^{-3}) foi determinada utilizando-se o volume calculado considerando-se a forma cilíndrica do briquete, com o respectivo peso. A densidade energética da biomassa (GJ m^{-3}) foi obtida multiplicando-se o poder calorífico pela densidade aparente (Protásio et al., 2011).

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade. Para tanto utilizou-se o programa Sisvar (Ferreira, 2019).

Resultados e Discussão

Os resultados mostram que, de modo geral, as características físico-químicas analisadas foram afetadas significativamente pelo modo de prensagem e pelo tamanho de partícula dos briquetes, prevalecendo a significância da interação entre esses dois fatores (Tabela 1).

Tabela 1. Médias de características físico-químicas dos briquetes de sorgo BRS 716 obtidos a partir da biomassa em dois tamanhos de partículas (4 mm e 8 mm) e dois modos de prensagem.

Característica físico-química	Partícula de 4 mm		Partícula de 8 mm	
	Prensagem Cheio	Prensagem Meio + Meio	Prensagem Cheio	Prensagem Meio + Meio
Umidade (%)	16,84 A a	9,82 B a	8,65 A b	8,48 A a
Celulose (%)	37,76 A b	38,76 A a	39,84 A a	38,70 A a
Hemicelulose (%)	27,57 A a	28,74 A a	26,35 A a	26,37 A b
Lignina (%)	6,05 A a	6,24 A a	6,36 A a	6,36 A a
Cinzas (%)	2,68 B b	2,96 A a	3,20 A a	3,09 A a
Poder Calorífico (MJ.kgm^{-3})	16,42 B a	16,74 A a	16,57 A a	16,36 A b
Densidade aparente (kg.m^{-3})	390,70 A a	240,71 B b	338,57 A a	306,27 A a
Densidade energética (GJ.m^{-3})	6,41 A a	4,03 B b	5,61 A a	5,01 A a

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, dentro de cada tamanho de partícula, não diferem significativamente, pelo teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade. Médias seguidas da mesma letra minúscula, para cada tipo de prensagem, não diferem significativamente, pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade.

O teor médio de umidade dos briquetes produzidos variou de 8,48% a 16,84%. O teor de umidade da biomassa é uma característica importante porque afeta diretamente o balanço energético da densificação. Um teor de umidade menor proporciona uma maior produção de energia por unidade de massa (Vale et al., 2000). Frodeson et al. (2019) estudaram o efeito do teor de umidade entre 0% e 15% antes do processo de densificação e verificou que as propriedades mecânicas também são afetadas em função do teor de umidade.

O potencial energético de um material depende também das quantidades de celulose e hemicelulose presentes na biomassa, pois esses constituintes influenciam diretamente no teor de carbono fixo que as biomassas possuem. Quanto maior o teor de carbono fixo, mais lenta é a queima do material.

O teor médio de cinza encontrado nos briquetes avaliados (3%) está próximo à média do valor encontrado em outras biomassas agrícolas.

De acordo com Kunh (2022), conhecer o teor de cinzas de um combustível é também essencial para avaliar sua qualidade, uma vez que, quando se trata de combustível, quanto menor o teor de cinzas maior a quantidade de material combustível para queima, já que ela é considerada um material inorgânico. Padilla et al. (2016) recomendam que um parâmetro adequado do teor de cinzas na produção de briquetes é um volume inferior a 4%, tendo em vista sua característica abrasiva, evitando dessa forma a corrosão do equipamento. E Lehtikangas (2001) esclarece que valores superiores a 4% podem vir de fontes externas como impurezas adquiridas no transporte ou no processamento da matéria-prima. As cinzas são resíduos da combustão, e de acordo com sua composição química pode ocorrer a formação de incrustações nos equipamentos de combustão (Cortez et al., 2008; Tumuluru; Fillerup, 2020).

O poder calorífico é influenciado pelo teor de materiais voláteis presentes na biomassa. De acordo com a Tabela 1, pode-se observar que o resultado, para o tamanho de partícula de 4 mm, foi significativo quando o teor de umidade também apresentou diferença significativa. Para o tamanho de partícula de 8 mm, não houve diferença significativa para o poder calorífico. Quando se avaliou o modo de prensagem, não houve diferença significativa em nenhum dos modos avaliados.

Os briquetes obtidos, tanto com tamanho de partícula de 4 mm e 8 mm, nos dois modos de prensagem, apresentaram densidade aparente na faixa entre $240,71 \text{ kg m}^{-3}$ e $390,70 \text{ kg m}^{-3}$ e um baixo teor de cinzas, entre 2,68% e 3,20%. A densidade aparente é outra importante propriedade para a avaliação da biomassa como combustível sólido, sendo que um fator determinante para resultados promissores é a tecnologia empregada no processo de densificação (Ndindeng et al., 2015; Wang et al., 2018).

O valor médio da densidade energética obtido com a prensagem após o cilindro cheio superou, significativamente, o valor obtido com a prensagem em duas etapas (meio cilindro e cilindro cheio), quando foram utilizadas partículas de 4 mm, mas não houve diferença significativa entre os dois modos de prensagem, para caso de partículas com 8 mm (Tabela 1, Figura 3). Pode-se observar uma correlação positiva entre densidade energética e densidade aparente, ou seja, maiores valores de densidade energética associados a maiores valores da densidade aparente.

Os tamanhos de partícula não diferiram quando foi utilizada a prensagem com cilindro cheio, mas para prensagem em duas etapas o valor médio da densidade energética, para partículas de 8 mm superou, significativamente, a média apresentada pelos briquetes de 4 mm. (Tabela 1).

Wang et al. (2018) estudaram a influência do tamanho de partícula da casca de arroz na qualidade do briquete e observaram que o tamanho da partícula da biomassa teve efeitos semelhantes na resistência à compressão e na densidade do produto. A densidade dos briquetes obtidos de materiais de tamanho de partícula menor (1,8 mm ou 5 mm) foi maior do que a o dos materiais de tamanho de partícula maior (> 10 mm).

Souza e Vale (2016) também observaram a mesma tendência na avaliação das densidades aparente e energética em briquetes de biomassa lignocelulósica.

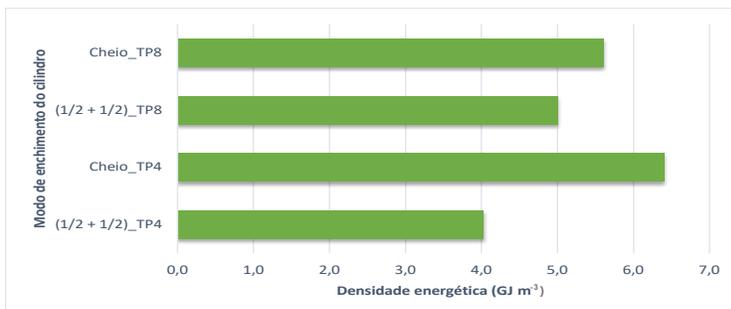


Figura 3. Gráfico representando o resultado obtido para a densidade energética dos briquetes de sorgo biomassa BRS 716.

Protásio et al. (2011) determinaram a densidade energética de briquetes obtidos em uma briquetadeira com controle de temperatura e pressão, a aproximadamente 6% de umidade, encontrando 23,8 GJ m⁻³ para os briquetes da casca de café, 17,65 GJ m⁻³ para os de resíduos de milho e 17,44 GJ m⁻³ para briquetes da serragem de eucalipto.

Os briquetes de sorgo biomassa BRS 716, prensados com tamanho de partícula de 4 mm e sem controle de temperatura e pressão, apresentaram resultados promissores, com densidades aparente e energética de 390,70 kg.m⁻³ e 6,41 GJ m⁻³, respectivamente, o que equivale a um aumento médio de aproximadamente quatro vezes em relação à densidade original de biomassas de gramíneas.

Conclusões

Os briquetes de sorgo apresentaram composição físico-química e propriedades termoquímicas com potencial para uso em caldeira ou outros equipamentos de queima.

O modo de prensagem influenciou a qualidade do briquete, sendo que a maior densidade energética e o menor teor de cinzas foram obtidos com o tamanho de partícula de 4 mm e com o cilindro cheio. Para o tamanho de partícula de 8 mm, o modo de enchimento do cilindro pode ser realizado por qualquer um dos dois modos, Cheio ou Meio+Meio, mas com valores de densidade energética inferiores aos de 4 mm.

Os briquetes produzidos, em uma prensa hidráulica manual, a partir do sorgo biomassa BRS 716, obtiveram resultados promissores: teor de cinzas 2,69%, densidade de 390,7 kg m⁻³, e densidade energética de 6,41 GJ·m⁻³.

Os briquetes de tamanho 4 mm e prensados com o cilindro cheio apresentaram, em média, densidade aparente de 390,70 kg·m⁻³, valores comparativamente de quatro vezes às biomassas das plantas (gramíneas).

Agradecimentos

À empresa JF, pela parceria e apoio ao trabalho, com a cessão da forrageira JF 1600 AT; ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), pelo apoio financeiro do projeto; e à Embrapa Milho e Sorgo, pela infraestrutura e pessoal de apoio na condução e avaliação dos dados de campo.

Referências

ARANSIOLA, E.; OYEWUSI, T.; OSUNBITAN, J. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. **Energy Reports**, v. 5, p. 909-918, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.011>

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BURIN, E. K.; BURANELLO, L.; LO GIUDICE, P.; VOGEL, T.; GÖRNER, K.; BAZZO, E. Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme. **Applied Energy**, v. 154, p. 232-241, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.100>

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. D. S.; GÓMEZ, E. O. (org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. 732 p.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

FRANCIK, S.; KNAPCZYK, A.; KNAPCZYK, A.; FRANCIK, R. Decision support system for the production of miscanthus and willow briquettes. **Energies**, v. 13, n. 6, 1364, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13061364>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

FRODESON, S.; HENRIKSSON, G.; BERGHEL, J. Effects of moisture content during densification of biomass pellets, focusing on polysaccharide substances. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. 7, p. 322-330, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.048>

KUMAR, R.; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: Lantana camara and Prosopis juliflora. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 17, p. 158-164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13196-020-00268-8>

KUNH, S. S. **Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem**. 2022. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

LEHTIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, n. 5, p. 351-360, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)

MORALES-MÁXIMO, M.; RUIZ-GARCIA, V. M.; LOPEZ-SOSA, L. B. Exploitation of wood waste of Pinus spp for briquette production: a case study in the community of San Francisco Pichataro, Michoacan, Mexico. **Applied Sciences-Basel**, v. 10, n. 8, 2933, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10082933>

MANTOVANI, E. C.; MAY, A. Mecanização. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 41-50. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

MANTOVANI, E. C.; SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. C.; OLIVEIRA, A.; PIMENTEL, M. A. G. **Alternativas preliminares de processamento do sorgo biomassa, visando a redução do teor de umidade da massa**

colhida para obtenção da maior eficiência energética. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 30 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 195).

NDINDENG, S.; MBASSI, J.; MBACHAM, W.; MANFUL, J.; GRAHAM-ACQUAAH, S.; MOREIRA, J.; DOSSOU, J.; FUTAKUCHI, K. Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products. **Energy Sustain**, v. 29, p. 24-31, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.003>

PADILLA, E. R. D.; PIRES, I. C. S. A.; YAMAJI, F. M.; FANDIÑO, J. M. M. Production and physical mechanical characterization of briquettes from coconut fiber and sugarcane straw. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1334-1346, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20160095>

PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.

SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. da C.; MAY, A.; SCHAFFERT, R. E. Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 5, p. 1682-1695, 2018.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879>

SOKHANSANJ, S.; TURHOLLOW, A. F. Biomass densification: cubing operations and costs for corn stover. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 4, p. 495-499, 2004.

TUMULURU, J. S.; FILLERUP, E. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, p. 1105-1124, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2121>

VALE, A. T. do; CARVALHO, M. A. M.; VEIGA, C. M.; ARRUDA, R. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia*

mangium Willd. em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 1, p. 153-162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.002>

Embrapa

Milho e Sorgo

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

