

PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DA ARBORIZAÇÃO URBANA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.IV-045>

Marcos Paulo Patta Granado*, Andrea Cressoni De Conti

* Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), Rosana, SP, Brasil
marcos.granado@unesp.br

RESUMO

A torrefação e a densificação de biomassa são processos de tratamento utilizados para elevar o valor energético de resíduos que apresentam baixa densidade energética. A poda urbana, resíduo sólido proveniente da arborização, apresenta potencial para uso energético. No entanto, sua utilização sem tratamento apresenta dificuldades devido à alta umidade e ao formato irregular do material. Neste trabalho, resíduos da arborização urbana foram separados em galhos e folhas, torrefados a 280 °C por 45 minutos e, posteriormente, densificados na forma de briquetes, utilizando pressão de 10 MPa e temperatura de 90 °C. A torrefação elevou o poder calorífico dos galhos de 18,7 MJ/kg para 21,3 MJ/kg e das folhas de 19,4 MJ/kg para 22,4 MJ/kg, com redução mássica de 76% e 75%, respectivamente. A densificação resultou em briquetes com densidades aparentes de 974, 1049 e 1050 kg/m³, utilizando os materiais torrefados compostos por 100% galhos, 100% folhas e mistura de 50:50, respectivamente. A combinação dos processos elevou a densidade energética do resíduo entre 5 a 14%, demonstrando uma alternativa sustentável para o aproveitamento energético de resíduos atualmente descartados em aterros. Briquetes produzidos a partir de resíduos da arborização urbana torrefada está em acordo com as políticas nacionais Programa Cidades Verdes Resilientes (PCVR) e Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), e com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): (7) Energia Acessível e Limpa, (8) Trabalho Decente e Crescimento Econômico, (11) Cidades e Comunidades Sustentáveis e (13) Ação Contra a Mudança Global do Clima.

PALAVRAS-CHAVE: Bioenergia, Briquetes, Poda Urbana, Torrefação.

ABSTRACT

Torrefaction and densification are pretreatment processes used to enhance the energy value of residual biomass with low energy density. Urban pruning, a solid residue derived from urban tree pruning, exhibits potential for energy utilization. However, its direct application presents challenges due to its high moisture content and irregular shape. In this study, urban pruning residues were separated into branches and leaves, torrefied at 280 °C for 45 minutes, and subsequently densified into briquettes using a pressure of 10 MPa and a temperature of 90 °C. Torrefaction increased the higher heating value (HHV) of the branches from 18,7 MJ/kg to 21,3 MJ/kg, and of the leaves from 19.4 MJ/kg to 22.4 MJ/kg, with mass yield of 76% and 75%, respectively. Densification resulted in briquettes with apparent densities of 974, 1049, and 1050 kg/m³, using torrefied materials composed of 100% branches, 100% leaves, and a 50:50 mixture, respectively. The combination of both processes led to an increase in energy density between 5 and 14%, demonstrating as a sustainable alternative for energy recovery from biomass residues that is currently disposed of in landfills. Briquettes produced from torrefied urban tree pruning residues align with national policies such as the *Programa Cidades Verdes Resilientes* (Green and Resilient Cities Program, PCVR) and the Plano Nacional de Resíduos Sólidos (National Solid Waste Plan, Planares), as well as with the Sustainable Development Goals (SDGs): (7) Affordable and Clean Energy, (8) Decent Work and Economic Growth, (11) Sustainable Cities and Communities, and (13) Climate Action.

KEY WORDS: Bioenergy, Briquettes, Torrefaction, Urban Pruning.

INTRODUÇÃO

O interesse por eletricidade gerada a partir da queima de biocombustíveis têm aumentado globalmente, uma vez que ainda se queima carvão mineral para suprir a demanda energética. Resíduos urbanos, como poda de árvore, podem ser

utilizados para produção de bioenergia, desde que tratados e pré-processados. Métodos de secagem, moagem, torrefação e densificação, podem ser empregados para valorizar energeticamente os resíduos e reduzir seus impactos no ambiente.

O uso da biomassa residual na geração distribuída de eletricidade contribui na preservação ambiental, na diversificação da matriz energética nacional e no desenvolvimento econômico regional (FERREIRA et al., 2018). Entretanto, assim como grande parte dos resíduos, a poda constitui-se de um material heterogêneo com alto teor de umidade, que resulta em uma matéria-prima com baixa densidade energética e baixo valor agregado. Além disso, a gestão deste resíduo é um problema para muitos municípios brasileiros devido ao alto custo de descarte adequado, em aterros ou em outros locais de destinação (MEIRA, 2010). A valorização energética de resíduos de poda pode ser viável utilizando métodos adequados de avaliação, de projetos, de análises e de tecnologias de conversão de biomassa (MACCARINI et al., 2020).

Processos de tratamento são utilizados para aprimorar as propriedades do material. Comparada ao carvão mineral, os teores de umidade, oxigênio e hidrogênio da biomassa são altos. Como resultado seu poder energético é menor. Para aumentar o poder energético da biomassa sólida, aplicar o processo de torrefação é uma alternativa. A torrefação consiste em aquecer a matéria-prima em temperatura entre 200-300 °C em atmosfera controlada, secando o material durante o aquecimento inicial e volatilizando uma fração mássica de seus constituintes durante o aquecimento posterior (BASU e KAUSHAL, 2023). Silveira et al. (2023), verificou que a torrefação de uma mistura de madeira de diferentes espécies de árvores urbanas da cidade de Brasília/DF, a 275 °C aumentou o poder calorífico do material de 19,83 MJ/kg para 21,47 MJ/kg com uma redução de 22% da massa inicial.

A densidade da biomassa pode ser aumentada por meio do processo de densificação. Nesse processo é aplicado uma força mecânica para remover a porosidade presente entre as partículas do material, podendo ser densificado na forma de péletes ou briquetes. A densificação da cepa de mandioca foi analisada em estudos anteriores, Granado et al. (2021), no qual resultou em briquetes com densidade energética de 5,7 a 7,7 vezes maior. Verificou-se também, De Conti et al. (2022), que briquetes produzidos a partir da mistura de bagaço e palha de cana-de-açúcar com cepa de mandioca apresentam maior resistência e durabilidade.

De acordo com Chen, Peng e Bi (2015), biocombustíveis produzidos por torrefação e densificação podem substituir o carvão em termoeletricas. Densificar material torrefado exige uma alta pressão no processo para produzir bons briquetes. Yang et al. (2021), reportam que briquetes de madeira torrefada apresentaram alta durabilidade após aumentar a umidade do material de 6 para 10% e aumentar a pressão de densificação de 28 para 38 MPa. Neste trabalho, os resíduos da poda urbana foram torrefados e densificados aplicando aquecimento no processo para produzir briquetes com maior resistência sem o uso de ligantes.

A produção de biocombustíveis sólidos a partir da poda urbana contribui diretamente para quatro Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): (7) Energia Acessível e Limpa, (8) Trabalho Decente e Crescimento Econômico, (11) Cidades e Comunidades Sustentáveis e (13) Ação Contra a Mudança Global do Clima. Além disso, a gestão desse resíduo está alinhada ao Programa Nacional Cidades Verdes Resilientes nas temáticas: Áreas Verdes e Arborização Urbana, e Gestão de Resíduos Urbanos (2024). Também se enquadra na política de combustíveis derivados de resíduos proposta pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal combinar os processos de torrefação e briquetagem para produzir biocombustível sólido a partir de resíduos da poda urbana, visando a geração de calor e energia como alternativa sustentável para a gestão desses resíduos.

Com o objetivo de verificar o efeito de diferentes composições no poder energético e na densidade final dos briquetes, o material foi separado em folhas, galhos e mistura. As propriedades energéticas foram determinadas por meio da análise imediata (umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas) e do poder calorífico superior. As propriedades físicas dos briquetes foram analisadas com através da expansão volumétrica e densidade energética.

METODOLOGIA

O resíduo de poda urbana foi coletado em pontos de descarte da cidade de Rosana/SP. Após a coleta, o material foi separado manualmente entre folhas e galhos; triturado em triturador forrageiro; e seco em estufa com ventilação forçada

em 80 °C até atingir teor de umidade entre 9 e 12%. A densidade a granel foi determinada conforme a norma ISO 17828:2015.

O processo de torrefação foi realizado em forno mufla em temperatura de 280 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C /min, durante 45 minutos. Os materiais foram inseridos formas de alumínio fechadas para limitar a passagem de oxigênio durante o processo. A torrefação do material foi expressa em função do rendimento mássico (RM) e do rendimento energético (RE), conforme descrito por Basu e Kaushal (2023). RM corresponde a fração da massa inicial da biomassa que permanece após a torrefação, com base seca e livre de cinzas; RE é a fração da energia inicial da biomassa que permanece após a torrefação.

Em sequência, o material torrefado foi moído em moinho de facas utilizando peneira interna com abertura de 2,0 mm. Para analisar as propriedades energéticas, realizou-se análise química imediata e análise do poder calorífico superior (PCS). Estas análises foram realizadas para os resíduos in natura e torrefados. A análise imediata determina o teor de umidade (ISO 18134:2017), matéria volátil (ISO 18123:2015), teor de cinzas (ISO 18122:2015) e carbono fixo (calculado por diferença). A análise do PCS foi realizada utilizando uma bomba calorimétrica.

O processo de densificação utilizado para produzir os briquetes foi realizado através de uma briquetadeira hidráulica laboratorial, com controle de pressão e temperatura. A confecção dos briquetes foi realizada utilizando temperatura de densificação regulada em 90 °C, no qual cada briquete foi confeccionado com 30 gramas, pressão de compactação de 10 MPa, tempo de prensagem de 3 minutos e tempo de resfriamento de 7 minutos. Foram produzidos 5 briquetes de galhos torrefados (100G); 5 briquetes de folhas torrefadas (100F); e 5 briquetes com mistura de 50% galhos torrefados e 50% folhas torrefadas (50G50F).

A variação do volume dos briquetes foi verificada durante as 72 horas após a produção, conforme descrito por De Conti et al. [9]. Para isso, realizou-se medições de altura e diâmetro dos briquetes com o auxílio de um paquímetro digital após 1 h, 3 h, 5 h, 7 h, 24 h, 48 h e 72h da compactação. A densidade aparente foi determinada com base na massa e no volume de cada briquete. Por fim, a densidade energética foi calculada multiplicando a densidade aparente pelo PCS. Durante as análises, os briquetes foram acondicionados em sacos plásticos para evitar ganho de umidade.

RESULTADOS

Os dados obtidos pela análise imediata, poder calorífico superior (PCS) e rendimentos do processo de torrefação são apresentados na Tabela 1. Nota-se que o PCS obtido para os resíduos in natura foi semelhante. Após a torrefação, os galhos torrefados apresentaram um aumento mais expressivo no PCS de 16%, em comparação com o aumento de 11% observado nas folhas torrefadas. O poder calorífico é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa do combustível.

Além disso, o conteúdo de voláteis diminuiu, enquanto o carbono fixo aumentou após a torrefação. Isso ocorre porque, durante o processo, os constituintes voláteis de baixo peso molecular e baixo valor energético são degradados (BASU e KAUSHAL, 2023). As quantidades de voláteis e carbono fixo são essenciais para o processo de combustão. O conteúdo volátil representa a fração mássica do combustível que se volatiliza durante o aquecimento e é queimado no estado gasoso. Já o carbono fixo indica a quantidade de carbono sólido presente no combustível após a perda do conteúdo volátil, desconsiderando as cinzas. O rendimento mássico foi similar para as folhas e galhos torrefados, mas o rendimento energético dos galhos foi superior, indicando que uma fração maior de energia foi retida nos galhos torrefados, em comparação com as folhas.

A expansão volumétrica dos briquetes é apresentada na Figura 1. Os briquetes produzidos a partir de galhos torrefados (100G) apresentaram o maior volume inicial, de 27,9 cm³, e uma expansão de 5,1% em relação ao seu volume inicial. Já os briquetes produzidos a partir da mistura (50G50F) apresentaram o menor volume inicial, de 26,3 cm³, com uma expansão de 3%. Os briquetes produzidos a partir de folhas torrefadas (100F) tiveram um volume inicial de 26,8 cm³ e uma expansão de 2,8% após 72 horas de produção. Em geral, briquetes com maior densidade tendem a apresentar maior durabilidade e resistência mecânica (GRANADO et al., 2021). Em estudos anteriores, De Conti et al. (2022), observou-se uma expansão entre 4,5% e 6,3% para briquetes produzidos a partir de cepa de mandioca, bagaço de cana, palha de cana e suas respectivas misturas.

Tabela 1. Propriedades energéticas dos materiais.

Material	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	PCS (MJ/kg)	RM (%)	RE (%)
Folhas <i>In natura</i>	9,6	73,4	5,6	21,0	19,4	-	-
Folhas Torrefada	2,5	65,0	7,2	27,8	22,4	75,0	86,8
Galhos <i>In natura</i>	12,0	76,4	4,4	19,3	18,7	-	-
Galhos Torrefado	2,6	69,7	3,8	24,5	21,3	76,0	86,6

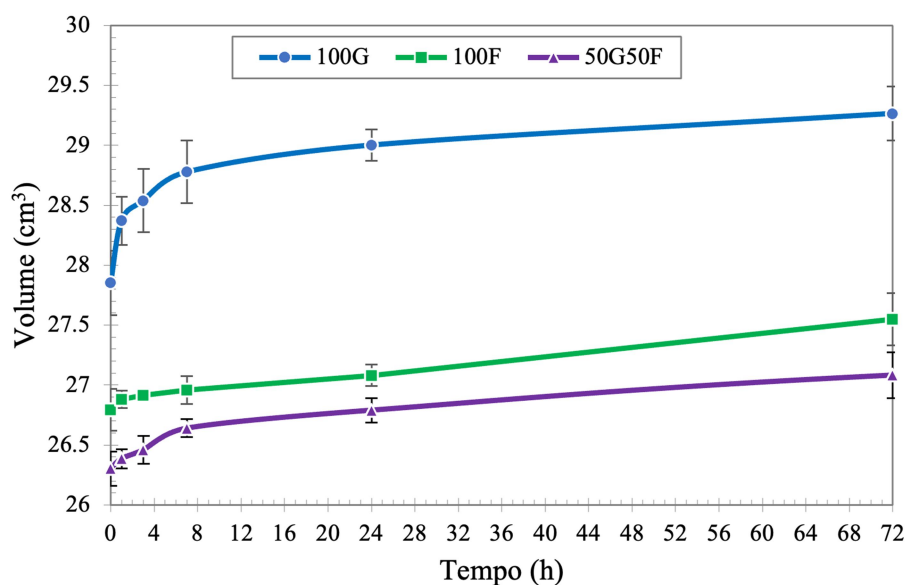


Figura 1: Gráfico de Expansão volumétrica dos briquetes. Fonte: Autor do Trabalho.

Os valores de densidade energética dos materiais em cada etapa do processo estão ilustrados na Figura 2. A densidade energética corresponde à quantidade de energia contida por volume. Após a torrefação e moagem dos materiais, observou-se que a densidade energética das folhas, galhos e da mistura aumentou em 3,9, 1,9 e 2,9 vezes, respectivamente, em comparação com os valores iniciais. Este aumento é devido ao aumento do PCS após a torrefação e do menor volume ocupado pelo material após a moagem.

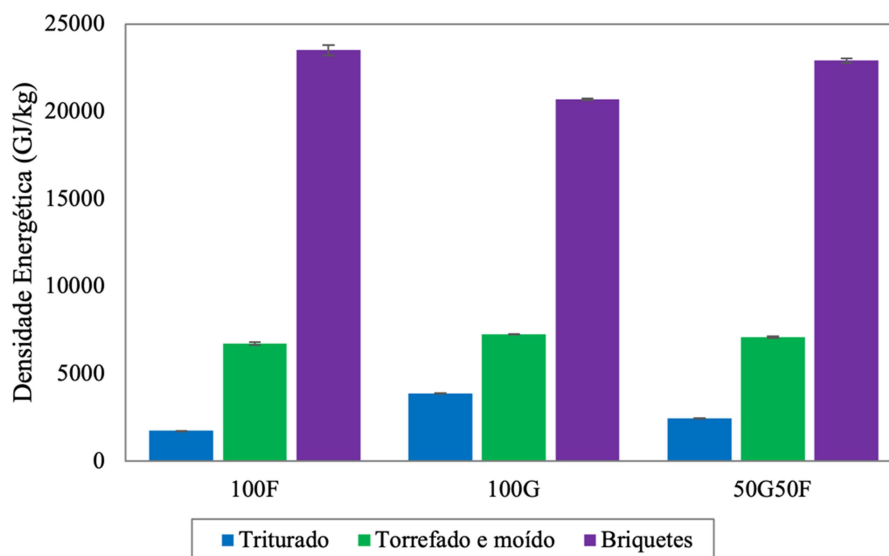


Figura 2: Gráfico de Densidade energética dos resíduos triturado *in natura*, torrefado e moído, e dos briquetes.

Fonte: Autor do Trabalho.

Após a briquetagem, o aumento foi ainda mais expressivo: 13,5 vezes para a amostra 100F; 5,3 vezes para 100G; e 9,3 vezes para a mistura 50G50F. Nota-se que 100F apresentou a maior densidade energética, de 23,5 GJ/m³, seguida pela mistura 50G50F, com 22,9 GJ/m³, e por 100G, com 20,7 GJ/m³. Esses resultados indicam que a presença combinada de folhas e galhos não apenas contribui na formação dos briquetes com menor volume, como também eleva o valor energético do material. Dessa forma, elimina-se a necessidade de triagem ou separação do material, o que facilita o processo e torna a produção mais eficiente.

CONCLUSÃO

Em conclusão, o resíduo da poda de árvores urbanas, geralmente descartado em aterros, pode ser convertido em biocombustível sólido por meio dos processos de torrefação e briquetagem, promovendo seu uso como fonte energética para geração de calor e eletricidade. A torrefação permitiu a produção de briquetes com alta densidade energética, mesmo com diferentes proporções de galhos e folhas, o que pode eliminar a necessidade de triagem do resíduo e simplificar a logística de processamento. Dessa forma, a produção de briquetes a partir da poda urbana se apresenta como uma solução integrada para a gestão de resíduos em acordo com as políticas nacionais como o Programa Cidades Verdes Resilientes (PCVR) e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.
2. MEIRA, A.M. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. 179p. Piracicaba: USP, 2010.
3. MACCARINI, A. C.; BESSA, M. R.; ERRERA, M. R. Energy valuation of urban pruning residues feasibility assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105763, 2020.
4. BASU, P.; KAUSHAL, P. **Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: practical design, theory, and climate change mitigation**. Elsevier, 2023.
5. SILVEIRA, E. A. et al. Urban lignocellulosic waste as biofuel: thermal improvement and torrefaction kinetics. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, n. 1, p. 197-212, 2023.
6. GRANADO, M. P. P. et al. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, v. 167, p. 306-312, 2021.
7. DE CONTI, A. C. et al. Binderless briquetting of mixed cassava rhizome, sugarcane bagasse, and sugarcane straw for producing solid biofuel with high durability. **BioEnergy Research**, v. 15, n. 1, p. 507-516, 2022

8. CHEN, W.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847-866, 2015.
9. YANG, I. et al. Densification of torrefied Pinus radiata sawdust as a solid biofuel: Effect of key variables on the durability and hydrophobicity of briquettes. **Fuel Processing Technology**, v. 214, 2021
10. BRASIL. Decreto nº 12.041, de 5 de junho de 2024. Institui o Programa Cidades Verdes Resilientes. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 5 jun. 2024.
11. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos — Planares**. Brasília, DF: MMA, 2022.
12. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 17828:2015 — **Solid biofuels — Determination of bulk density**. Geneva: ISO, 2015.
13. _____. ISO 18134:2017 — **Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method**. Geneva: ISO, 2017.
14. _____. ISO 18123:2015 — **Solid biofuels — Determination of the content of volatile matter**. Geneva: ISO, 2015.
15. _____. ISO 18122:2015 — **Solid biofuels — Determination of ash content**. Geneva: ISO, 2015.