

PEGADA DE CARBONO ASSOCIADA COM O GERENCIAMENTO DA PODA URBANA: ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA O DESCARTE EM ATERROS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.V-019>

Marcos Paulo Patta Granado (*), Sonil Nanda, Andrea Cressoni De Conti

* Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), Rosana, SP.

* Dalhousie University, Faculty of Agriculture, Department of Engineering, Truro, NS, Canadá.

Email: marcos.granado@unesp.br

RESUMO

O descarte da poda urbana em aterros sanitários representa a prática mais comum nos municípios brasileiros. A poda, composta por galhos, folhas e outros materiais lenhosos provenientes da arborização urbana, é gerada em atividades rotineiras de manutenção, realizadas por razões de segurança ou fins estéticos. Contudo, essa prática acarreta impactos ambientais e elevados custos de gerenciamento. Uma alternativa é realizar o aproveitamento energético da poda, por meio de processos de torrefação e densificação, capazes de produzir biocombustíveis sólidos com maior valor agregado. O objetivo deste estudo foi avaliar se a conversão da poda urbana em briquetes torrefados pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Foram analisados três cenários: (1) disposição em aterro, (2) incineração e (3) produção de briquetes a partir da poda torrefada. A pegada de carbono foi calculada pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme a norma ISO 14040:2006. Foram considerados CO₂, CH₄ e N₂O, convertidos em CO₂ equivalente, de acordo com o potencial de aquecimento global do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2013, para um horizonte temporal de 100 anos. Os resultados demonstraram que a disposição em aterros apresentou o maior impacto ambiental, enquanto a torrefação seguida de briquetagem resultou na menor pegada de carbono, com 41,87 kgCO₂eq/t de resíduo coletado. Além disso, a geração de eletricidade a partir da poda urbana apresentou emissões de 40,12 kgCO₂eq/MWh, valor inferior à média anual do sistema elétrico nacional. Em conclusão, o uso energético da poda urbana possui elevado potencial para mitigar emissões de gases de efeito estufa e contribuir para o alcance dos objetivos de desenvolvimento sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de ciclo de vida, biomassa, briquetes, torrefação, resíduos sólidos.

INTRODUÇÃO

A crescente urgência por economias circulares e soluções de baixo carbono evidencia a importância de não apenas substituir o uso de fontes fósseis de combustíveis por fontes renováveis, mas também de utilizar e reutilizar os recursos disponíveis a partir dos resíduos. Eventos climáticos extremos já ocorrem globalmente em razão das mudanças climáticas, e limitar o aquecimento global abaixo de 2°C ainda no neste século se torna cada vez mais desafiador (IPCC, 2023). Nesse contexto, alcançar as emissões líquidas zero, por meio da redução e captura das emissões de gases de efeito estufa, torna-se essencial. O aproveitamento de resíduos agrícolas, florestais, industriais e municipais possibilita a produção sustentável de biocombustíveis e a captura e estocagem de carbono, contribuindo para a redução de emissões e para o enfrentamento dos desafios da descarbonização.

O rápido aumento da população global, urbanização e atividade econômica tem contribuído de forma significativa para o aumento na geração de resíduos sólidos urbanos, o que representa desafios ambientais e logísticos nas áreas urbanas em todo o mundo (Nanda; Berruti, 2021). No Brasil, dentre as diversas frações dos resíduos sólidos urbanos, os resíduos de poda urbana têm recebido pouca atenção. Composto por galhos, folhas e outros materiais lenhosos provenientes de podas, esse resíduo é geralmente gerado durante atividades rotineiras de manutenção realizadas por motivos de segurança urbana ou fins estéticos (Muscas *et al.*, 2024). Os municípios brasileiros geralmente gerenciam esse resíduo por meio de disposição em aterros sanitários ou queima a céu aberto, o que resulta em impactos ambientais e aumento dos custos operacionais (Araújo *et al.*, 2018; González; López; Pérez, 2020). Apesar dos desafios logísticos decorrentes da variação sazonal, da composição heterogênea e do elevado teor de umidade, a biomassa de poda urbana apresenta um potencial energético considerável.

A utilização energética de resíduos de poda, entretanto, demanda etapas de secagem e moagem com elevado consumo energético, exigindo sistemas de combustão robustos para garantir a recuperação eficiente da energia, seja em pequena ou grande escala (Maccarini; Bessa; Errera, 2020). O tratamento dos resíduos de poda urbana representa uma estratégia promissora para promover seu uso como fonte de energia. A combinação dos processos de torrefação e densificação

para a produção de um biocombustível sólido pode agregar valor a essa matéria-prima, ao mesmo tempo em que mitiga os desafios associados ao seu manejo e destinação final. Nesse contexto, além da necessidade de verificar a viabilidade técnica, a análise dos impactos ambientais durante a torrefação, densificação e queima dos briquetes é necessária.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite analisar os impactos ambientais em diferentes fases do processo. A metodologia de ACV inclui quatro etapas principais: definição de objetivos e escopo, inventário de dados, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. A definição do escopo estabelece os limites do estudo e os impactos ambientais a serem considerados. O inventário consiste na coleta de dados sobre o consumo de recursos, emissões e geração de resíduos. A avaliação quantifica os impactos ambientais relacionados ao uso de recursos naturais e às emissões para o meio ambiente, enquanto a interpretação identifica áreas de melhoria no processo ou no produto, visando à redução dos impactos ambientais. A fim de mensurar a quantidade total de emissões de gases de efeito estufa, direta ou indiretamente causadas ao longo das etapas de vida de um produto, a pegada de carbono é uma ferramenta que pode ser aplicada em conjunto com a ACV (De Oliveira Fernandes *et al.*, 2025).

A produção de briquetes torrefados a partir da poda urbana apresenta-se como alternativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, fornecer energia limpa e acessível e contribuir para o alcance de metas relacionadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), incluindo: ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). Nesse contexto, ao fornecer dados sobre os impactos ambientais do manejo da poda urbana como fonte de bioenergia, este estudo apresentar relevância na orientação da formulação de políticas públicas e no incentivo a adoção de tecnologias limpas e renováveis, promovendo, assim, a sustentabilidade na gestão de resíduos sólidos urbanos.

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo verificar se o aproveitamento da poda urbana para produção de biocombustível sólido a partir de processos de torrefação e densificação podem reduzir as emissões de gases do efeito estufa a partir de uma análise da pegada de carbono baseada na avaliação do ciclo de vida. Para isso, três cenários foram explorados: 1) Descarte em aterros; 2) Incineração; e 3) Produção de briquetes a partir da poda urbana torrefada.

METODOLOGIA

A análise de pegada de carbono foi conduzida através da metodologia de avaliação do ciclo de vida conforme a norma ISO 14040:2006, utilizando uma abordagem baseado em processos. Os gases de efeito estufa considerados neste estudo foram: CO₂, CH₄ e N₂O, convertidos em CO₂ equivalente de acordo com Potencial de Aquecimento Global (GWP) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2013 para um horizonte temporal de 100 anos.

DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS E LIMITES DO SISTEMA

Os cenários e limites do sistema são ilustrados na Figura 1. Foram adotadas duas unidades funcionais baseadas na entrada e saída do processo: uma definida como a geração de 1 tonelada de biomassa de poda urbana e outra definida como a geração de 1 MWh de energia a partir de briquetes torrefados, respectivamente.

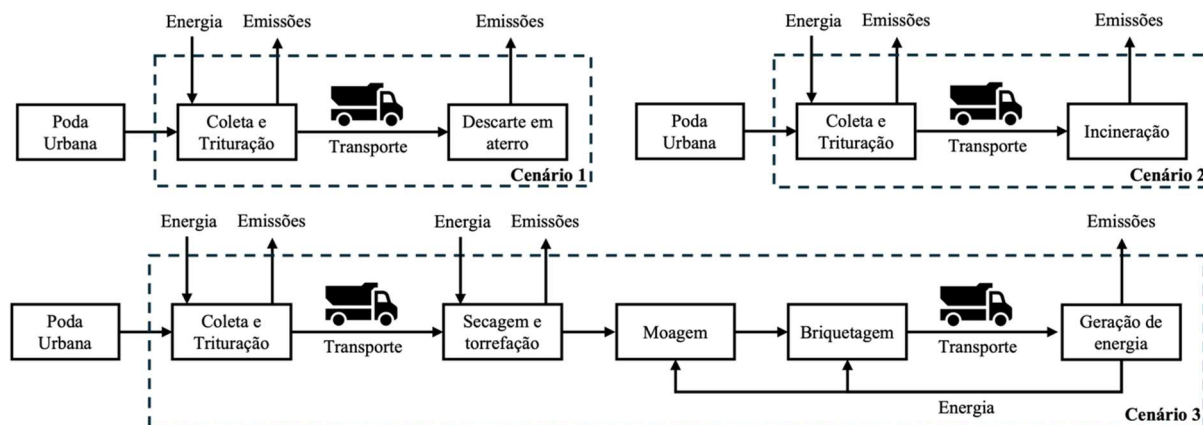


Figura 1: Limites do sistema e fluxos de processos avaliados para os Cenários 1, 2 e 3. Fonte: Autor do Trabalho.

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Assumiu-se que os resíduos de poda urbana coletados são triturados diretamente no local da coleta, utilizando um triturador movido a diesel, e posteriormente transportados para uma instalação de descarte ou processamento. Para a trituração, foi selecionado um triturador a diesel com capacidade de processamento de 17,5 m³/h e consumo de combustível de 6,5 L/h.

Para o transporte, foram considerados caminhões caçamba com capacidade de 6 m³ e carga máxima de 10 toneladas. A distância média de transporte entre os pontos de coleta e o destino foi estimado em 10 km. Os fatores de emissão para o transporte foram baseados em dados fornecidos pelo MMA (2011).

O fornecimento de energia térmica para os processos de secagem e torrefação foi subdividido em cinco etapas de aquecimento. A primeira etapa, pré-secagem, envolve o aquecimento da biomassa das condições ambiente até a temperatura de secagem. Em seguida, ocorre a etapa de secagem, que é a mais intensiva em energia, pois requer um aporte significativo para evaporar o teor de água. Na etapa de pós-secagem, a biomassa é aquecida da temperatura de secagem até a temperatura de torrefação preestabelecida. Por fim, durante a etapa de torrefação, ocorre a maior parte da despolimerização da biomassa, liberando gases de torrefação utilizados como combustível suplementar para o aquecimento do reator. A demanda total de energia térmica foi calculada como a soma dos requisitos energéticos de cada etapa individual, conforme a metodologia proposta por Basu e Kaushal (2023). A Figura 2 apresenta o esquema do sistema de torrefação considerado neste estudo. A energia térmica foi fornecida pela combustão do próprio material torrefado, considerando uma eficiência do sistema de combustão de 90%.

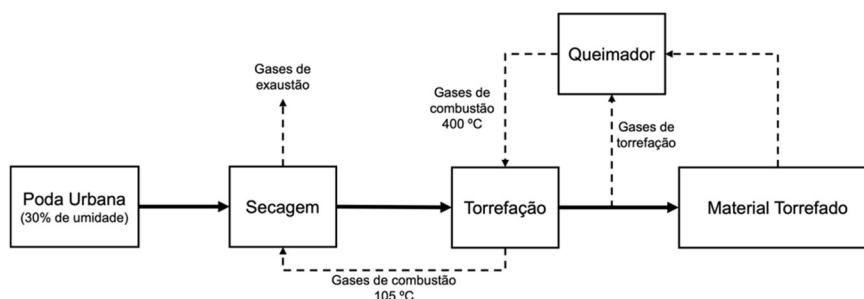


Figura 2: Esquema do sistema de torrefação. Fonte: Autor do Trabalho.

A energia de moagem necessária para o material torrefado foi determinada experimentalmente, conforme a metodologia proposta por Manouchehrinejad, Van Giesen e Mani (2018).

A energia necessária para a briquetagem foi estimada com base no modelo descrito por Kawakita e Lüdde (1971), no qual o trabalho é derivado da redução de volume. O consumo específico de energia foi então utilizado para calcular a demanda total de energia para briquetar o material. O calor necessário para aumentar a temperatura da biomassa durante a compressão foi incluído no cálculo do consumo específico de energia. Para o transporte dos briquetes, foram considerados caminhões com capacidade de 14 m³ e distância média de transporte até a central termelétrica de 200 km.

Por fim, para o cálculo de geração de energia elétrica, foi considerado uma eficiência de conversão de 41,47%.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para avaliar os resultados, foram realizadas as análises de sensibilidade: uma variando o teor de umidade da poda urbana coletada de 30% para 50% e outra excluindo a recirculação dos gases de torrefação como fonte de calor no processo de torrefação.

RESULTADOS

Os dados coletados para o inventário do ciclo de vida são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados do inventário do ciclo de vida. Fonte: Autor do Trabalho.

Estágio do ciclo de vida	Parâmetro	Unidade	
Coleta e trituração	Umidade	%	30
	LHV	MJ/kg	17,28
	Uso de combustível	L/t de material	1,78
Transporte	Densidade	kg/m ³	210,11
	Distância média	km	10
	Uso de combustível	L/t de material	3,29
Secagem e torrefação	Umidade após secagem	%	5
	Temperatura de torrefação	°C	280
	Umidade após torrefação	%	1,5
	Rendimento mássico	%	75
	LHV	MJ/kg	19,69
Moagem	Perdas	%	2
	Consumo elétrico	kWh/t	15,74
Briquetagem	Perdas	%	2
	Pressão de compactação	MPa	10
	Temperatura de compactação	°C	90
	Consumo elétrico	kWh/t	145,54
	Densidade	kg/m ³	1100
Transporte dos briquetes	Distância média	km	200
	Uso de combustível	L/t de briquetes	100,5
Geração de energia elétrica	Eficiência	%	41,5

A Tabela 2 apresenta as emissões de gases de efeito estufa por tonelada de poda urbana gerenciada nos Cenários 1, 2 e 3. Observa-se que o descarte da poda urbana em aterros, Cenário 1, resulta na maior emissão kgCO₂eq por tonelada de poda urbana gerenciada. Ao comparar com o Cenário 2 e o Cenário 3, verifica-se que o aproveitamento energético apresenta o menor impacto ambiental.

Tabela 2. Emissões de CO₂eq por tonelada de poda urbana coletada. Fonte: Autor do Trabalho.

Estágio do processo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Coleta e transporte	12,8	12,8	12,8
Descarte em aterro	643,53	-	-
Incineração	-	32,06	-
Secagem e torrefação	-	-	2,14
Moagem	-	-	0,13
Briquetagem	-	-	0,37
Transporte	-	-	8,87
Geração de Energia	-	-	17,57
Total	656,34	44,86	41,87

A Tabela 3 apresenta as emissões de gases de efeito estufa por MWh de eletricidade gerada a partir de briquetes produzidos com poda urbana torrefada. Para a geração de 1 MWh de energia elétrica, são emitidos 40,12 kgCO₂eq. Em 2025, a média anual de emissões no Brasil para a geração de energia foi de 52,3 kgCO₂eq por MWh gerado (SIRENE, 2025). Portanto, a geração de energia no Cenário 3 tem o potencial de evitar a emissão de gases de efeito estufa provenientes de outras fontes geradoras, o que pode ser abatido nas emissões do processo.

Tabela 3. Emissões de CO₂eq por MWh de eletricidade gerada para o Cenário 3. Fonte: Autor do Trabalho.

Estágio do processo	Cenário 3
Coleta e transporte	12,29
Secagem e torrefação	1,98
Moagem	0,13
Briquetagem	0,35
Transporte	8,51
Geração de Energia	16,86
Total	40,12

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de sensibilidade para o Cenário 3. Realizar o processo de torrefação sem a recirculação dos gases de torrefação resultou em um aumento de 20% nas emissões. Já considerando a poda urbana coletada com umidade de 50% observou-se um aumento nas emissões de 44% com a recirculação dos gases e de 231% sem a recirculação. Esse aumento é resultante principalmente dos processos de secagem e torrefação, e da quantidade necessária de material coletado e transportado para geração de 1 MWh.

Tabela 4. Análise de sensibilidade para o Cenário 3. Fonte: Autor do Trabalho.

Estágio do processo	Com 30% de umidade sem recirculação	Com 50% de umidade com recirculação	Com 50% de umidade sem recirculação
Coleta e transporte	16,30	23,14	43,83
Secagem e torrefação	5,63	8,89	21,80
Moagem	0,13	0,13	0,13
Briquetagem	0,35	0,35	0,35
Transporte	8,51	8,51	8,51
Geração de Energia	16,86	16,86	16,86
Total	47,77	57,87	91,48

CONCLUSÕES

Neste trabalho verificou-se que as emissões de gases de efeito estufa pelo processo de descarte apresenta o maior impacto ao meio ambiente. A geração de biocombustível sólido a partir de processos de torrefação e briquetagem apresentaram o cenário com menor pegada de carbono de 41,87 kgCO₂eq/t de resíduo coletado. Além disso, a geração de energia elétrica a partir da poda urbana apresentou emissão menor que a emissão média anual do sistema elétrico nacional em 2025 de 40,12 kgCO₂eq/MWh gerado. Portanto, o uso energético dos resíduos de poda urbana apresenta potencial para contribuir com a redução de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com os seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: (7) Energia Acessível e Limpa, (11) Cidades e Comunidades Sustentáveis e (13) Ação Contra a Mudança Global do Clima.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), ao programa Canada Research Chairs (CRC) e à Research Nova Scotia pelo apoio financeiro a esta pesquisa colaborativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

2. NANDA, S.; BERRUTI, F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 403, p. 123970, fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>.
3. MUSCAS, D.; ORLANDI, F.; PETRUCCI, R.; PROIETTI, C.; RUGA, L.; FORNACIARI, M. Effects of urban tree pruning on ecosystem services performance. **Trees, Forests and People**, [s. l.], v. 15, p. 100503, mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100503>.
4. ARAÚJO, Y. R. V.; DE GÓIS, M. L.; JUNIOR, L. M. C.; CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 1863–1868, jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0613-y>.
5. GONZÁLEZ, W. A.; LÓPEZ, D.; PÉREZ, J. F. Biofuel quality analysis of fallen leaf pellets: Effect of moisture and glycerol contents as binders. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 147, p. 1139–1150, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.094>.
6. MACCARINI, A. C.; BESSA, M. R.; ERRERA, M. R. Energy valuation of urban pruning residues feasibility assessment. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 142, p. 105763, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105763>.
7. DE OLIVEIRA FERNANDES, M. A.; BAÊTA, B. E. L.; ADARME, O. F. H.; FONSECA, A. LCA-based carbon footprint analysis of anaerobic digestion of coffee husk waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 207, p. 114993, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114993>.
8. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
9. MMA. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários: relatório final**. 2011.
10. BASU, P.; KAUSHAL, P. (Eds.). **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction**. Fourth Edition. [S. l.]: Elsevier, 2023. DOI 10.1016/C2022-0-02464-8.
11. MANOUCHEHRINEJAD, M.; VAN GIESEN, I.; MANI, S. Grindability of torrefied wood chips and wood pellets. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], vol. 182, p. 45–55, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.10.015>.
12. Kawakita K, Lüdde KH (1971) Some considerations on powder compression equations. *Powder Technol* 4(2):61–68.
13. SIRENE. Fatores de emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2025. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>