

Carbonização de resíduos de coco verde em sistema fornos-fornalha para a produção energética e de biochar

Resumo: O objetivo deste trabalho foi carbonizar resíduos de coco verde e avaliar o seu potencial para a produção energética e de biochar. Os resíduos de coco verde utilizados na carbonização foram obtidos do descarte de comerciantes locais e carbonizados à 500°C em sistemas fornos-fornalha adaptados com monitoramento de temperatura feito por sistema supervisorio. O carvão vegetal de coco verde atingiu excelentes resultados de carbono fixo (75,38%), área superficial (153,1 m²/g) e relação O/C (0,19) que atendem à produção energética e de biochar, inclusive atendendo à requisitos do European Biochar Certificate (EBC).

Palavras-chave: Reaproveitamento de resíduos, energia, biochar

Carbonization of green coconut waste in a Kiln-furnace system for energy production and biochar

Abstract: The research objective was to carbonize coconut waste and assess its potential for energy production and biochar. The coconut waste used in the carbonization process was obtained from discards and carbonized at 500°C in adapted kiln-furnace systems with temperature monitoring by a supervisory system. The coconut charcoal achieved excellent results in fixed carbon (75.38%), surface area (153.1 m²/g), and O/C ratio (0.19), meeting the requirements for both energy production and biochar, including satisfying the criteria of the European Biochar Certificate (EBC).

Key-words: Waste reuse, energy, biochar

1. INTRODUÇÃO

No contexto mundial, cerca de 83,1% do abastecimento de energia é proveniente de combustíveis fósseis e com o crescente aumento da demanda energética e da preocupação com problemas ambientais, têm-se buscado alternativas para a redução do uso de fontes não renováveis na matriz energética (IEA, 2020; KOCER, 2024).

Uma oportunidade de diversificar a matriz energética e favorecer o aumento da utilização de fontes renováveis é o reaproveitamento de resíduos urbanos, agrícolas e florestais produzidos atualmente em grandes quantidades em muitos países, principalmente os de clima tropical, como o

Brasil (CAI et al., 2017; GARCIA et al., 2017).

O biochar tem ganhado notoriedade no setor florestal devido sua capacidade de aprimorar as propriedades do solo, pois suas características, quando aplicadas ao solo, levam ao aumento do pH, carbono orgânico e CTC. Além disso, o biochar tem excelente capacidade de sequestrar carbono da atmosfera, pois se encontra em sua forma aromática estável do carbono orgânico, diferente da biomassa que a originou, emitindo menos gás carbônico na atmosfera, mitigando a emissão que essa matéria-prima in natura poderia causar. (TRAZZI et al., 2018).

A biomassa residual do coco verde tem sido um material com grande potencial para a utilização como fonte alternativa de energia, podendo substituir combustíveis fósseis quando transformado em carvão vegetal e utilizados como biochar ao serem incorporados no solo, podendo alcançar novos mercados, como o de créditos de carbono. Estima-se que a produção de coco verde no Brasil seja de 2,65 milhões de toneladas e que este resíduo gaste de 8 a 12 anos para ser decomposto completamente. Dessa forma, estudar alternativas para o reaproveitamento desse material é necessário (SILVA et al., 2014; DIAS et al., 2019; MIOLA et al., 2020).

Posto isso, o objetivo deste trabalho foi carbonizar resíduos de coco verde e avaliar o seu potencial para a produção energética e de biochar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os resíduos de coco verde utilizados na carbonização foram obtidos do descarte de comerciantes locais no município de Viçosa, Minas Gerais e, em seguida, foram rachados e submetidos à secagem ao ar livre até atingirem um teor de umidade abaixo de 40% (Figura 1).

Figura 1. Instalação dos tambores de coleta de resíduos de coco verde e recolhimento da matéria-prima (A). Resíduos de coco verde partidos e dispostos em galpão aberto para secagem natural (B).



Fonte: Acervo LAPEM (2023)

Após a secagem, os resíduos foram carbonizados em um forno com capacidade de 1 m³ adaptado do sistema fornos-fornalha, no qual a copa de alvenaria foi substituída por uma tampa metálica para facilitar trabalhabilidade no forno com os resíduos (Figura 2).

Figura 2. Forno adaptado do sistema fornos-fornalha para a carbonização de resíduos de coco verde



Fonte: Acervo LAPEM.

Para a carbonização, as taxas de aquecimento foram definidas de acordo com o teor de umidade da biomassa enforada e a temperatura final desejada (500°C) para obtenção das curvas de carbonização. O monitoramento da temperatura foi realizado utilizando o sistema supervisor da *Carbontech* em parceria com o LAPEM. Antes da carbonização, a massa enforada foi pesada e o teor de umidade do material in natura foi determinado. Ao fim do processo, o forno foi descarregado, o material carbonizado foi pesado para determinação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal e foram retiradas amostras para a determinação das suas propriedades (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades do carvão vegetal e metodologias utilizadas

Propriedade	Metodologia
Rendimento gravimétrico	Siqueira (2021)

Análise Química Imediata	NBR 6923 (ABNT, 1981); NBR 8112 (ABNT, 1986).
Análise Química Elementar	Paula et al., (2011)
BET	DFT Cumulative Surface Area

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carbonização dos resíduos de coco verde à 500°C teve duração total de 9 horas, a partir de um material com teor de umidade inicial de 35,97%. A curva de carbonização obtida está apresentada na Figura 3.

Figura 3. Curva de carbonização dos resíduos de coco verde

Observa-se que a curva real de carbonização dos resíduos de coco verde, ficou muito próxima da curva teórica (ideal), que foi definida conforme o teor de umidade da biomassa enfiada e a temperatura final desejada. Nota-se que o maior desvio observado na curva foi na terceira fase da carbonização (250°C-500°C), em **FASE 1** está ocorrendo **FASE 2a** decomposição dos principais constituintes da biomassa (JESUS et al., 2019), onde há uma elevação de temperatura abrupta para alcançar a temperatura final. Considerando que o teor de umidade da biomassa enfiada foi de 35,97%, a taxa de aquecimento seria naturalmente mais lenta, como observado por Arruda et al. (2011) ao estudarem a pirólise de biomassas com teor de umidade acima de 30%. Logo, recomenda-se estabelecer uma fase de carbonização intermediária entre 250° e 500°C para respeitar o ritmo de aquecimento e degradação da biomassa de coco verde.

Na Tabela 2, encontram-se os resultados das propriedades do carvão vegetal de coco verde.

Tabela 2. Propriedades do carvão vegetal de coco verde

Propriedade	
Rendimento gravimétrico (%)	23,73
Teor de carbono fixo (%)	75,38
Teor de materiais voláteis (%)	11,45
Teor de cinzas (%)	13,18
Teor de C (%)	81,83
Teor de H (%)	1,86
Teor de O (%)	15,54

Teor de N (%)	0,63
Teor de S (%)	0,05
BET – Área Superficial (m ² /g)	153,1

Observa-se que o rendimento gravimétrico do carvão vegetal de coco verde foi de 23,73%, abaixo dos valores normalmente encontrados para madeira, principal biomassa convertida em carvão vegetal no Brasil, que tem um rendimento médio de 26% (CGEE, 2015). Ressalta-se que a elevada temperatura final e a elevada taxa de aquecimento da terceira fase da carbonização contribuíram para a redução do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, além das características da matéria-prima que também têm grande influência sobre o rendimento (SOMERVILLE E DEEV, 2020; GOMES et al., 2020). Porém, pondera-se que um dos objetivos da carbonização era o uso como biochar, portanto, o equilíbrio entre o rendimento e outras propriedades, como o carbono fixo e a área superficial, foi considerado.

O teor de carbono fixo obtido foi de 75,38%, dentro da faixa usual recomendada para o carvão vegetal de madeira para uso energético (PEREIRA et al., 2013), indicando um excelente estoque de carbono fixo nos resíduos de coco verde carbonizados, sendo importante também para o uso como biochar, devido à capacidade de armazenamento de carbono a longo prazo quando introduzido no solo (STEINBEISS et al., 2009). Yustanti et al. (2021), encontrou teores de carbono fixo de 64,49% ao carbonizar cascas de coco a 500°C em reator contínuo.

O teor de cinzas obtido (13,8%) é considerado um valor elevado e um ponto de atenção para a produção energética, dado que os valores recomendados são abaixo de 1%. Elevados teores de cinzas estão normalmente associados à desgaste de equipamentos, incrustações, corrosões e maiores custos de manutenção (NUNES et al., 2016; MAGALHÃES, 2020). Já para a produção de biochar, é necessário analisar a composição das cinzas, que corresponde à quantidade de materiais orgânicos presentes, para compreender quais minerais e metais compõem o biochar e como podem contribuir ou prejudicar o uso desse material no solo (KHAWKOMOL et al., 2021).

A área superficial encontrada para os resíduos de coco verde carbonizados foi de 153,1 m²/g. O biochar de resíduos de coco vem sendo

relatado como um material de alta área superficial, tornando-o um eficiente condicionante do solo (WANG E WANG, 2019). A área superficial do carvão vegetal é uma característica importante para o uso como biochar, que diz respeito à capacidade de adsorção, de interação e de complexação com outros elementos, sendo muito influenciada pelas características da matéria-prima e do processo produtivo (AJIEN et al., 2022; MANIKANDAN et al., 2023). Adorna et al. (2020), ao carbonizar, via pirólise lenta, a casca interna do coco a 550°C, obteve uma área superficial de 97,40 m²/g enquanto Wang et al. (2021) obteve uma área superficial de 177,59 m²/g e Hidayat et al. (2015) de 163 m²/g.

Em relação à quantidade de carbono elementar, a razão O/C do biochar (0,19) foi cinco vezes menor do que a da biomassa in natura (0,95), indicando melhores características de combustível. Para a produção de biochar, o biochar de coco verde produzido no LAPEM atendeu aos requisitos do European Biochar Certificate (EBC), dado que a relação O/C deve ser inferior a 0,4 (KHAWKOMOL et al., (2021).

4. CONCLUSÃO

A carbonização de resíduos de coco verde em fornos de alvenaria adaptados do sistema fornos-fornalha é tecnicamente viável, produzindo um carvão vegetal com potencial para uso energético e para uso como biochar, com excelentes resultados de carbono fixo (75,38%), área superficial (153,1 m²/g) e relação O/C (0,19) que atendem às duas destinações, inclusive atendendo à requisitos do European Biochar Certificate (EBC).

Conclui-se que o reaproveitamento dos resíduos de coco verde na produção de carvão vegetal é uma solução tecnológica capaz de reduzir impactos ao meio ambiente, além de agregar valor a uma biomassa que seria descartada sem tratamento prévio, ocasionando poluição urbana e acúmulo de resíduos.

5. AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –



Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial – Unidade de Fibras Florestais (EMBRAPIL), à Empresa Agricultura Bioativa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 8.112 **Carvões vegetal: análise imediata**. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- AJIEN, A.; IDRIS, J.; MD, S. N.; HUSEN R. *et al.* Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. **Waste Management & Research**.v. 41, p. 37-51. 2022.
- ADORNA, J.; BORINES, M.; DANG, D. V. *et al.* Coconut shell derived activated biochar–manganese dioxide nanocomposites for high performance capacitive deionization, **Desalination**, v. 492, 2020.
- ARRUDA, T. P. M. PIMENTA, S. A.; VITAL, R. B. *et al.* Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, Jan. 2011.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E.; Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American chemical society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE, **“Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia”**. Brasília, 2015.
- CAI, J.; HE, Y.; YU, X. *et al.* Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 76, p. 309-322, 2017.
- DIAS, N. B.; SCHNEIDER, P. Z.; CHAVES, G. L. D. *et al.* Aproveitamento da casca de coco para uso energético. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 3, p. 179-195, Jul. 2019.
- GARCIA, R.; PIZARRO, C.; LAVIN, A. G. *et al.* Biomass sources for thermal conversion. **Techno-economical overview**. Fuel, v. 195, p. 182-189, 2017.
- GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G. *et al.* Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência Florestal**., Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 677-687, jul.-set. 2020.
- HIDAYAT, A.; ROCHMADI, WIJAYA, K. *et al.* Reaction kinetics of free fatty acids esterification in palm fatty acid distillate using coconut shell biochar sulfonated catalyst. **AIP Conference Proceedings**. v. 1699, 2015.
- JESUS, M. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MARTINEZ, C. L. M. *et al.* Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. **Wood Science and Technology**, v.53, n.6, p.1353-1372, Nov. 2019.
- KOCER, A. Prediction of the higher heating values of biomass using machine learning methods based on proximate and ultimate analysis. **J Mech Sci Technol**. v. 38, p. 1569–1574, 2024.
- KHAWKOMOL, S.; NEAMCHAN, R.; THONGSAMER, T. *et al.* Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management.

Sustainability. v.13, 2021.

MAGALHÃES. Mateus Alves de. **Desenvolvimento de um processo de gaseificação de biomassa para a produção de gás combustível e síntese**. 2021. 105 f. tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.

MANIKANDAN, S.; VICKRAM, S.; SUBBAIYA, R. *et al.* Comprehensive review on recent production trends and applications of biochar for greener environment. **Bioresource Technology**. v. 388, 2023.

MIOLA B.; FROTA, M. M. M.; OLIVEIRA, A. G. *et al.* Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes.

Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, n. 4, p. 627–634, jul. 2020.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 53, p. 235-242, 2016.

PAULA, L.R.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Revista Cerne**, v.17, n.2, 2011, p.237-246.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal Properties. **BioResources, Raleigh**. v. 8, n. 3, p. 4574-4592, Jul. 2013.

SILVA, A. C. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, p. 4077-4086, 2014.

SIQUEIRA, H. F. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal**. 2021. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

SOMERVILLE M.; DEEV, A. The effect of heating rate, particle size and gas flow on the yield of charcoal during the pyrolysis of radiata pine wood, **Renewable Energy**, v. 151, p. 419-425, 2020.

STEINBEISS. S.; GLEIXNER G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity, **Soil Biology and Biochemistry**. v. 41, p. 1301-1310. 2009.

TRAZZI, A, P.; HIGA, R, A.; DIECKOW, J. *et al.* BIOCARVÃO: REALIDADE E POTENCIAL DE USO NO MEIO FLORESTAL. **Revista Ciência Florestal**. v. 28, p. 875-887, 2018.

WANG, C.; LI, L.; SHI, J.; JIN, H. Biochar production by coconut shell gasification in supercritical water and evolution of its porous structure. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 156, 2021.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**. v. 227, p. 1002-1022, 2019.

YUSTANTI, E.; WARDHONO, Y. E.; ANGGORO, T. M. *et al.* Types and composition of biomass in biocoke synthesis with the coal blending method. **L: Energy Sources**. v. 14, 2021.