

Aproveitamento dos Resíduos de Madeira para Geração de Bioenergia

Angelica M. dos Santos, Alisson A. Melo, Alex Queiroz, Leonardo Guimarães, Helder N. Consolaro & Antover P. Sarmento

A produção de energia usando biomassa de madeira tem sido destaque para a recuperação de energia e redução de emissões de carbono. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial dos resíduos de madeira em produzir bioenergia através de processos termoquímicos. As metodologias de avaliação dos resíduos foram iniciadas com a composição química do material de três fontes diferentes: urbano, industrial e supressão vegetal. Os processos de pirólise e carbonização hidrotérmica foram utilizados como processos de transformações para avaliar o ganho energético. Os resultados mostraram que os resíduos têm potencial para produção de bioenergia, com aumento no poder calorífico de até 76%.

Palavras-chave: *resíduo de madeira; bioenergia; processos termoquímicos.*

Energy production using biomass has been highlighted for energy recovery and reduction of carbon emissions. The main goal of this work is to evaluate the potential of wood waste to produce bioenergy through thermochemical processes. Waste assessment methodologies were initiated with the chemical composition of the material from three different sources: urban, industrial and vegetal suppression. Pyrolysis and hydrothermal carbonization were used as transformation processes to evaluate energy gain. The results showed that the waste has the potential for bioenergy production, with an increase in calorific power of up to 76%.

Keywords: *wood waste; bioenergy; thermochemical process.*

Introdução

A expressiva demanda por energia nos últimos anos deve-se ao crescimento da população e seus interesses tecnológicos. O maior potencial de fonte energética nos dias de hoje são os combustíveis fósseis, por meio dos quais, são gerados grandes impactos ambientais. Então novas perspectivas surgem a fim de utilizar outras fontes energéticas consideradas limpas e renováveis.

A bioenergia é a energia que utiliza como matéria-prima a biomassa, uma fonte renovável abundante na natureza, considerada como combustível sustentável por oferecer redução significativa nas emissões de carbono em comparação aos combustíveis fósseis¹. Dentro desta categoria de bioenergia, a madeira desempenha um papel importante em todo o mundo, seja para aquecimento residencial, combustível para fins culinários e geração de energia.

A utilização da madeira para bioenergia pode ser feita na sua forma bruta ou também através dos resíduos gerados. Os resíduos ganham destaque devido à redução das emissões no aterro, custos decorrentes do descarte e pelo apoio do gerenciamento de resíduos em geral. O desperdício de resíduo de madeira é notável, observado pelos grandes volumes gerados na construção civil, indústrias e supressão vegetal.

A escolha dos processos de conversão da madeira em bioenergia normalmente se baseia em diversos parâmetros, tais como o tipo, a quantidade e as características da biomassa em questão. Desta forma, análises de caracterização, tais como teor de extrativos, lignina, umidade, cinzas e celulose são fundamentais para avaliar a qualidade da madeira em produzir bioenergia. De maneira geral, esta conversão é realizada por meio da utilização de processos bioquímicos, termoquímicos ou físico-químicos².

A conversão termoquímica é a opção mais atraente, devido à sua maior eficiência e versatilidade. A pirólise, carbonização hidrotérmica, gasificação e a combustão se destacam. Estes processos diferem entre si pelas condições de operação (faixa de temperatura, taxa de aquecimento, ausência ou presença de oxigênio), exigência de alimentação a seco do material e do produto desejado³.

Portanto, este trabalho visa caracterizar três tipos de

resíduos de madeira provenientes da região de Catalão/GO, a fim de avaliar o potencial de geração de bioenergia através dos processos termoquímicos pirólise e carbonização hidrotérmica.

Materiais e Métodos

A pesquisa utilizou três fontes de resíduos de madeira, sendo elas, industrial, urbano e supressão vegetal da Usina Hidrelétrica da Serra do Facão (SEFAC). A amostragem foi estabelecida não-probabilística devido à heterogeneidade das amostras. Foram realizadas caracterizações químicas dos materiais, posteriormente, submetidos aos processos termoquímicos denominados de pirólise e carbonização hidrotérmica a fim de avaliar o potencial calorífico.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para avaliar as características químicas dos materiais foram analisados em relação aos principais constituintes da madeira: teores de lignina (NBR 7989)⁴, cinzas (NBR 13999)⁵, extrativos (NBR 7989)⁴ e holocelulose (oxidação da lignina em meio ácido)⁶.

PIRÓLISE

A pirólise é um processo de decomposição térmica em que a biomassa é decomposta pelo calor na ausência de oxigênio, levando à produção de carvão vegetal, produtos líquidos e gasosos⁷.

Para avaliação do processo, foi utilizado reator pirolítico, no qual a amostra foi posicionada na região central de um tubo de vidro cilíndrico, que foi introduzido no reator, acoplado a um sistema de condensação, conforme Figura 1.

Foi utilizado gás nitrogênio a uma vazão de 500 mL/min., antes e durante o processo de conversão, a fim de retirar todo oxigênio presente. O aquecimento foi iniciado a 10 °C/min e a temperatura foi mantida a 400 °C por 2 horas. Após passagem do gás pelo sistema de condensação, a fração aquosa e o óleo de pirólise foram recolhidos em um tubo graduado e sua separação foi realizada através da densidade. O carvão pirolítico foi retido no centro do reator e recolhido após resfriamento do sistema.

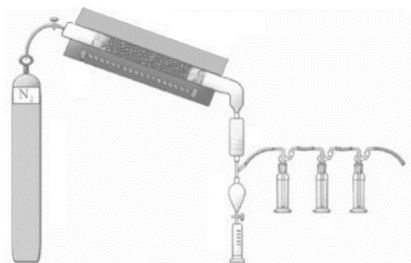


Figura 1. Diagrama esquemático do reator de pirólise utilizado.

CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA

A carbonização hidrotérmica visa à conversão de biomassa lignocelulósica a materiais carbonáceos usando condições mais brandas de processo. A temperatura do processo é inferior ao de processos de pirólise, por exemplo, e água é utilizada como meio de carbonização. A pressão do sistema é gerada pelo próprio aquecimento da água, sem necessidade de adição de agente de pressurização externa⁸.

Os experimentos foram realizados em Reator Piloto de Alta Pressão Metalquim, modelo HPR-10000CC, com volume interno de 10 L, conforme Figura 2. O reator foi preenchido com 200 g de resíduo de madeira e 6,5 L de água, o sistema foi mantido agitado com velocidade de 50 rpm e pressurizado a 10 bar com N₂ e despressurizado logo em seguida, a fim de remover quaisquer traços de oxigênio presentes no meio. A temperatura de trabalho variou de 160-200 °C. Os valores das variáveis de temperatura e tempo de residência iniciais foram baseados em referência da literatura⁹.

Após os procedimentos de carbonização, as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 105 °C, por 4 horas.

PODER CALORÍFICO

Os valores de poder calorífico (PCS) superior e inferior (PCI) foram calculados segundo a equação de Lloyd e Davenport¹⁰.

$$PCS_{seco} \left(\frac{kcal}{kg} \right) = (8546 \times C) + (27126 \times H) - (2018 \times O) + (1419 \times N) + (2672 \times S) \quad (1)$$

$$PCI_w \left(\frac{kcal}{kg} \right) = [(1 - w) \times (PCS_{seco})] - \{[(1 - w) \times 9 \times (H + w) \times 583,2)\} \quad (2)$$

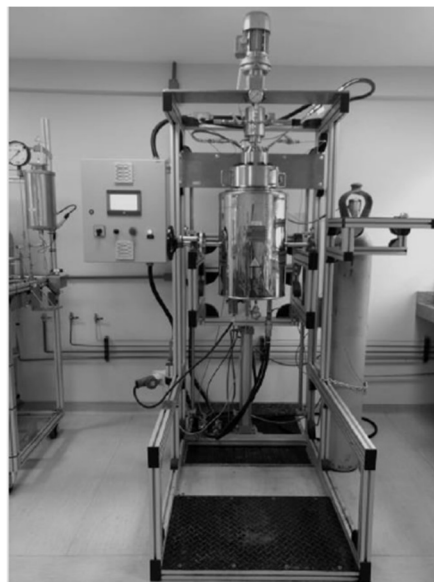


Figura 2. Reator de Alta Pressão Metalquim durante processo de carbonização hidrotérmica.

Em que: C, H, O, N e S representam, respectivamente, os percentuais em massa e em base seca de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, expressos entre 0 e 1, e w representa a umidade determinada em cada amostra. Para análise elementar, utilizou-se o equipamento Elemental Instruments, modelo Vario MicroCube. Para umidade, foi utilizado o método titulação Karl Fischer volumétrica.

Resultados e Discussão

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Figura 3 mostra a porcentagem de cada constituinte das diferentes amostras de resíduo. Observa-se que, apesar dos resíduos serem de diferentes fontes emissoras, as características químicas não sofreram grandes variações.

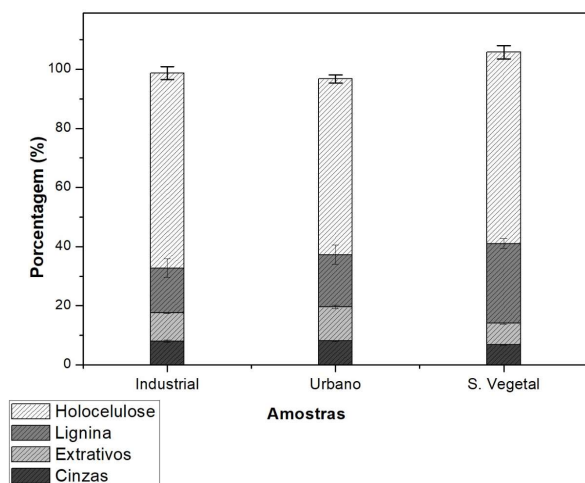


Figura 3. Gráfico de barras com os dados das caracterizações química das amostras.

O teor de cinzas corresponde basicamente à parte inorgânica do material. A porcentagem do teor de cinzas nas diferentes amostras foi de $7,63 \pm 0,26$ %. O teor de extrativos corresponde à fração orgânica da madeira, sendo variável de acordo com a espécie, idade, região de procedência e tratamento realizado na madeira. Os valores de extrativos foram obtidos entre 7,25 e 11,5%.

A lignina é a fração não-carboidrato da madeira livre de extrativos¹¹; os teores variam entre 15 e 35%. A complexa estrutura da lignina está relacionada com a rigidez da parede celular do material. Os valores encontrados nos materiais foram entre 15 a 27%, valores próximos à literatura. Designa-se por holocelulose o produto obtido após a remoção da lignina, sendo a combinação de celulose e hemicelulose. Para tal, foram obtidos valores entre 60 e 66%. Através dos dados observa-se que os teores de lignina e holocelulose foram inversamente proporcionais: quanto menores os valores de lignina maiores os teores de holocelulose.

De acordo com os resultados obtidos das caracterizações químicas, foi observada pequena variabilidade entre resultados obtidos para as diversas amostras de resíduos lenhosos. O processo de conversão da biomassa para o destino energético do material, em princípio, poderia ser comum para todas as categorias de madeira avaliadas,

dado o pequeno desvio padrão nas características químicas determinadas.

PIRÓLISE

Foram calculados os rendimentos da amostra de resíduo de madeira pirolisada, obtidos percentuais de água, bio-óleo, carvão e gás de pirólise. A Tabela 1 sumariza os valores obtidos para todas as amostras. A Figura 4 mostra a imagem dos produtos obtidos durante a pirólise.

Tabela 1. Composição mássica dos produtos gerados na pirólise.

Amostras	Água (%)	Bio-Óleo (%)	Carvão (%)	Gás de Pirólise (%)
Industrial	36	9	39	16
Urbano	37	9	30	24
S.Vegetal	40	8	29	33

Em termos de volume de carvão pirolítico, as amostras tiveram percentuais próximos variando entre 29 e 39%, sendo a amostra de resíduo industrial a que gerou maior volume deste material. Quanto à produção de bio-óleo, os resultados foram similares para as amostras de resíduo industrial e urbano (aproximadamente 9%), tendo a supressão vegetal rendimento próximo a 8%. A amostra da supressão vegetal foi a que apresentou rendimentos menos favoráveis, sendo 33% do material de partida foi convertido a gases. A Tabela 2 mostra os valores obtidos do poder calorífico das amostras iniciais e após a pirólise.

Foi observado um grande aumento no poder calorífico dos produtos em comparação aos materiais de partida. Os carvões pirolíticos tiveram, em média, valores de poder calorífico superiores aos bio-óleos, conforme o esperado.

O processo de pirólise foi capaz de aumentar o poder calorífico em até 76% na amostra de resíduo urbano quando avaliado o carvão gerado e em 43% quando avaliado o bio-óleo, tornando-se um processo poderoso para geração de materiais com potencial energético. Considerando que o carvão vegetal tradicional apresenta poder calorífico próximo a 7500 kcal/kg, pode-se inferir que os resultados foram extremamente favoráveis.



Figura 4. Carvão e Bio-Óleo obtidos do processo de pirólise.

CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos nas determinações de poder calorífico superior e inferior das amostras antes e após o processo de carbonização hidrotérmica.

Tabela 3. Poder calorífico das amostras após carbonização hidrotérmica.

	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)		Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)		Aumento Percentual (%) do PCI
	Antes	Depois	Antes	Depois	
Amostras					
Industrial	4810,35	5458,52	4076,79	4889,73	19,94
Urbano	4693,45	5496,80	3957,01	4745,22	19,92
S.Vegetal	5381,77	6327,44	4093,96	4887,87	19,39

Através dos dados, é possível verificar que as diferentes amostras obtiveram o mesmo aumento do poder calorífico: cerca de 19% em comparação aos valores de partida. O carvão produzido no processo carbonização hidrotérmica apresentou menores rendimentos de poder calorífico em relação ao carvão pirolítico.

Conclusão

Os resíduos de madeira demonstraram potencial como insumo para fins energéticos. Em relação à composição química das diferentes fontes de resíduos pode-se afirmar que praticamente não há diferenças entre as amostras analisadas, o que possibilita o destino dos resíduos para um único processo tecnológico. O processo de pirólise se demonstrou promissor gerando carvão com aumento do poder calorífico inferior em até 76% e bio-óleo com poder calorífico inferior de 6119,67 kcal/kg, já o processo

Tabela 2. Poder calorífico dos produtos de pirólise.

Poder Calorífico Superior (kcal/kg)			Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)			Aumento Percentual (%) do PCI		
Amostras	Inicial	Bio-Óleo	Carvão	Inicial	Bio-Óleo	Carvão	Bio-Óleo	Carvão
Industrial	4810,35	6485,54	7167,38	4076,79	5981,59	6513,23	46,72	59,76
Urbano	4693,45	6119,67	7528,63	3957,01	5657,63	6968,97	42,98	76,12
S. Vegetal	5381,77	5311,29	7472,05	4093,96	4964,19	6936,73	21,26	69,44

da carbonização hidrotérmica resultou em percentuais menores (19%) do poder calorífico inferior do carvão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Concessionária Serra do Fação - SEFAC da Fundação Getulio Vargas - FGV e da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL no âmbito do projeto de P&D (P&D 06899-2712/2016) que viabilizou a realização deste trabalho.

Referências

- Chew, J.; Doshi, V. Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 15, n. 8, p.4212-4222, **2011**.
- Vega, L. Y. et al. Assessment of energy potential of wood industry wastes through thermochemical conversions. *Waste Management*, [s.l.], v. 87, p.108-118, **2019**.
- Zhang, L.; Xu, C.; Champagne, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion And Management*, [s.l.], v. 51, n. 5, p.969-982, **2010**.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. 6 p. **2010**.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira — Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. 5 p. **2017**.
- Browning, B. *Methods of wood chemistry*. John Wiley and Sons: New York, 882p., **1967**.
- Sheth, P.; Babu, B.V. Differential evolution approach for obtaining kinetic parameters in nonisothermal pyrolysis of biomass. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 51, n. 1, p. 47-52, **2009**.
- Titirici, M. M.; Antonietti, M. Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization. *Chem. Soc. Rev.*, v. 39, p. 103-116, **2010**.
- Simsir, H.; Eltugral, N.; Karagoz, S. Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood chips via low-temperature and their characterization. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 246, p.82-87, **2017**.
- Poli, D. C. R. et al. Uma Avaliação das Metodologias para Determinação do Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. *Revista de ciências exatas e tecnologia*, [S.l.], v. 8, n. 8, p. 9-31, **2013**.
- Klock, U.; Muñiz, G. I. B.; Hernandez, J. A.; Andrade, A. S. Química da madeira. FUPEF: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, Curitiba, **2005**.

Angelica M. dos Santos^{1,2*},
 Alisson A. Melo¹, Alex
 Queiroz³, Leonardo
 Guimarães³, Helder N.
 Consolaro¹ & Antover P.
 Sarmiento¹

¹ PPGCET / DQ – Universidade Federal de Goiás – UFG Regional Catalão, Catalão, 75.704-020

² Fundação Getulio Vargas/Energia – Praia de Botafogo, 190, Rio de Janeiro/RJ, 22.250-145

³ Instituto SENAI de Inovação Química Verde - Rua Morais e Silva, 5, Rio de Janeiro/RJ, 20271-030

* E-mail: angelica.santos@fgv.br