



ARTIGO ORIGINAL

Orildo Ribeiro dos Santos¹
Nadia Cristina Fernandes Corrêa²
Luiz Ferreira de França^{1*}

¹ Universidade Federal do Pará/ITEC/PPGEQ,
Rua Augusto Correa, 1, 66075-110, Belém,
PA, Brasil

² Universidade Federal do Pará/ITEC/FEA,
Rua Augusto Correa, 1, 66075-110, Belém,
PA, Brasil

*Autor Correspondente:
E-mail: franca@ufpa.br

PALAVRAS-CHAVE

Craqueamento térmico
Material lignocelulósico
Biomassa
Óleo de palma

KEYWORDS

Thermal cracking
Lignocellulosic material
Biomass
Palm oil

Processo de transformação termoquímica da torta do mesocarpo do dendê para obtenção de biocombustíveis

Thermochemical transformation of the oil palm mesocarp cake to produce biofuel

RESUMO: A cadeia produtiva do dendê vem se expandindo rapidamente na região norte do Brasil, resultando em uma grande produção de resíduos sólidos e líquidos. A utilização desses resíduos como matéria-prima para a produção de biocombustíveis via processamento térmico é uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental e valorizar a cadeia produtiva do dendê. Entre estes resíduos está a torta do mesocarpo do dendê (TMD), que representa cerca de 25% do fruto. O objetivo deste estudo foi investigar o efeito da temperatura sobre as características dos produtos obtidos através da transformação termoquímica da TMD. Os experimentos foram realizados em temperaturas entre 150 e 550°C, usando um reator cilíndrico de aço inox de 7,5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com capacidade volumétrica de 440 cm³, aquecido com resistência elétrica de 1,5 kW. As análises mostraram que a TMD é um material lignocelulósico com 45% de celulose, 21% de hemicelulose e 34% de lignina, tendo 22,5 MJ/kg de poder calorífico. Os resultados mostraram que os rendimentos de líquido e gás aumentam com o aumento da temperatura, enquanto o produto sólido diminui. Os produtos líquidos apresentaram uma similaridade na composição para as diferentes temperaturas de processamento, porém os produtos sólidos tiveram aumento significativo no teor de carbono fixo com a temperatura. Nos produtos sólidos, a maior taxa de degradação de celulose e hemicelulose ocorreu em temperaturas acima de 250°C, com prevalência de lignina nos produtos obtidos a temperaturas mais altas.

ABSTRACT: The palm oil production chain has been expanding rapidly in the northern region of Brazil, leading a large production of solid and liquid wastes. The use of these residues as raw material for the production of biofuels via thermal processing is a viable alternative to reduce the environmental impact and valorize the palm oil production chain. Among these residues is the oil palm mesocarp cake (OPMC), which represents about 25% w/w of the fruit. The objective of this study was to investigate the effect of temperature on the characteristics of the products obtained through the thermochemical transformation of OPMC. The experiments have been carried out at temperatures between 150 and 550°C, using a cylindrical reactor of stainless steel of 7.5 cm in diameter and 10 cm in height, with volumetric capacity of 440 cm³, heated with electric resistance of 1.5 kW. The analyzes showed that OPMC is a lignocellulosic material with 45% cellulose, 21% hemicellulose and 34% lignin, having heating value 22.5 MJ/kg. The results showed that the yields of liquid and gas increase with increasing temperature while the solid product decreases. The liquid products presented a similarity in the composition for the different processing temperatures, however the solids had a significant increase in the fixed carbon content with the temperature. In solid products, the highest degradation rate of cellulose and hemicellulose occurred at temperatures above 250°C, with the prevalence of lignin in products obtained at higher temperatures.

Recebido em: 09/08/2018
Aceite em: 27/10/2018

1 Introdução

A utilização de biomassa para produção de energia tornou-se uma importante estratégia para reduzir o impacto ambiental nocivo provocado pelo consumo dos recursos energéticos de origens fósseis. Deste modo, grandes pesquisas estão sendo voltadas para a utilização dos resíduos agroindustriais como biomassa potencial para a geração de energia renovável.

O processamento térmico da biomassa é uma das alternativas viáveis para converter resíduos das agroindústrias em biocombustíveis com alta eficiência energética. As cadeias produtivas do etanol e biodiesel, considerados combustíveis de primeira geração, geram resíduos aptos a serem convertidos em outros biocombustíveis através de processos termoquímicos. Com a valorização destes resíduos, poderá ser viável o uso total da biomassa, aumentando a eficiência dos processos produtivos e atribuindo maior viabilidade econômica às tecnologias empregadas. Os combustíveis provenientes destes resíduos podem ser classificados como biocombustíveis de segunda geração.

Os biocombustíveis provenientes da biomassa através do processamento térmico são mais apropriados para consumo em larga escala, pois apresentam baixos índices de poluição, alta eficiência energética e baixo custo de matéria-prima. Além do uso direto como biocombustíveis, os produtos obtidos na degradação térmica das biomassas podem também ser empregados como fontes de matérias-primas para produção de diversos produtos com composições semelhantes aos de origem fósseis (Bridgwater & Peacocke, 2000; Mohan et al., 2006).

Os principais processos de conversão termoquímica de biomassa em energia ocorrem através da combustão, pirólise e gaseificação. A combustão é um processo que produz energia térmica através da queima direta da biomassa, com aproveitamento do calor de reação como fonte de energia. A pirólise é uma rota promissora para a produção de produtos na forma sólida (carvão), líquida (alcatrão e outros produtos orgânicos e aquosos) e gasosa (H_2 , CO_2 , CO) com potencial para uso como combustível ou outro insumo químico. A gaseificação é um processo flexível que produz gases de composição e conteúdo energético variável, dependendo do agente de gaseificação e das condições de operação (Subramani & Gangwal, 2008).

O processo de pirólise rápida é uma decomposição térmica operada na ausência de oxigênio, em que a biomassa é rapidamente aquecida e convertida principalmente em aerossóis e vapores condensáveis, que, após arrefecimento e condensação, dão origem a um produto líquido. Este produto líquido é uma mistura complexa de centenas de compostos orgânicos, consistindo principalmente de álcoois, cetonas, aldeídos, fenóis, oligômeros e derivados de lignina (Zhang et al., 2013). Geralmente este produto líquido compreende duas fases, sendo uma não aquosa, contendo substâncias de elevada massa molecular, denominada bio-óleo, e uma aquosa, constituída majoritariamente de compostos de baixa massa molecular (Hossain & Davies, 2013). A fase aquosa é derivada da umidade presente na biomassa e de produtos de reações que ocorrem durante o processo de pirólise.

O bio-óleo contém um número elevado de compostos oxigenados, incluindo ácidos, açúcares, álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, furanos, fenóis, oxigenados mistos e outros

(Huber & Iborra, 2006). O bio-óleo é instável, podendo sofrer polimerização e condensação ao longo do tempo pelo aumento da temperatura e a presença de ar e luz, resultando em um aumento de viscosidade. Possui diversos usos em razão de não ter um composto principal, mas sim famílias de compostos. No entanto, para utilização como produtos de interesse comercial, é necessário passá-lo por refino, pois o melhoramento permite a obtenção de vários produtos como fertilizantes, adesivos, flavorizantes e combustíveis (Mohan et al., 2006).

A biomassa lignocelulósica geralmente contém 35-50% de celulose, seguido de 20-35% de hemicelulose, 10-25% de lignina e uma pequena quantidade de extrativos (Santos et al., 2012). A celulose, polímero linear formado por unidades de glicose, produz, por degradação térmica, principalmente levoglucosano, glicolaldeído, 5-hidroximetil furfural, hidroxiacetaldeído, ácido acético, ácido fórmico e carvão, a maioria dos quais solúveis em água. A hemicelulose, polímero ramificado baseado em hexose, pentose e ácido glicurônico, é menos resistente termicamente e sua degradação origina os ácidos carboxílicos, que são a base para obtenção do biocombustível (Guedes et al. 2010). A lignina, quando pirolisada, é responsável pela presença de compostos aromáticos no bio-óleo (em especial os derivados fenólicos) e contribui para a formação de carvão (Bridgwater et al., 2002).

Entre as principais fontes de biomassa para produção de energia de segunda geração estão os materiais de origem agrícola. Nestes pode-se incluir os resíduos agroindustriais, como aqueles gerados na indústria de óleo de palma (ou dendê).

A cadeia produtiva do dendê vem ganhando grandes expansões na região norte, sendo incentivada pela perspectiva de uso do óleo de palma (óleo da polpa do dendê) como matéria-prima para produção de biodiesel. Porém, a produção de óleo de palma acarreta em grande produção de resíduos sólidos e líquidos, que precisam de um destino adequado para que não prejudiquem o meio ambiente. O uso desse material como matéria-prima para a produção de biocombustíveis via processamento térmico é uma alternativa promissora, pois impede que esse resíduo seja depositado na natureza, além de possibilitar a produção de energia limpa, contribuindo para melhorar a qualidade de vida das pessoas envolvidas na cadeia de produção ou seus arredores.

O estado do Pará, como maior produtor de dendê do Brasil – com uma área plantada de 200.000 ha e em expansão, produtividade de cerca de 20 ton de cacho por hectare (Costa et al., 2017) –, gera anualmente cerca de 2 milhões de toneladas de subprodutos, sendo que cerca de 25% representam a torta resultante da prensagem do mesocarpo do fruto (OPMC). Esta grande quantidade de biomassa gerada a partir da extração de óleo de palma representa potencial fonte de energia renovável. Isto justifica o interesse em realizar um estudo sobre as tecnologias de transformação desta biomassa em combustíveis de maior valor agregado.

2 Material e Métodos

A TMD usada como matéria-prima para o estudo foi obtida pelo processo de produção industrial de óleo de palma bruto na usina da empresa Biopalma, localizada na cidade de Moju, no Pará, distante 150 km de Belém. Foi transportada

em recipientes de polietileno de baixa densidade de 10 kg até o Laboratório de Operações de Separação (LAOS), na Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram feitos os procedimentos experimentais.

A sua caracterização foi feita através da análise imediata, utilizando a metodologia descrita nas normas NBR 8112, ASTM D-3175, E871, E872 e D1102; da determinação do poder calorífico superior por leitura direta num calorímetro isoperibólico (PARR, 6200, Illinois, USA), que é padronizado com base na norma ASTM D4809 – 13; e da determinação dos teores de celulose, hemicelulose e lignina usando os métodos de FDA e FDN, descritos respectivamente por Van Soest (1963) e por Van Soest e Wine (1967).

Foi feita também análise térmica diferencial (TGA) para adquirir informações sobre a cinética do processo de degradação térmica em condições analíticas. Nesta análise foi usada amostra de cerca de 20 mg num aparelho TGA (NETZSCH F1 LIBRA, TG 209, Selb, Alemanha) sob atmosfera inerte (gás nitrogênio), a uma razão de aquecimento de 10°C/min, de 25 a 800°C, com fluxo de gás de purga de 20 mL/min.

Os experimentos de transformação termoquímica da TMD foram realizados em um equipamento instalado no LAOS/UFPA, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 1. Ele é composto por um reator com diâmetro de 7,5 cm e comprimento de 10,0 cm, com capacidade volumétrica de 440 cm³, construído em aço inoxidável com tampa flangeada, envolto em uma manta de aquecimento com resistência interna de 1,5 kW, tendo a temperatura medida e controlada através

de sensor tipo K. Todo este conjunto está acomodado em uma câmara de isolamento térmico. Na saída da câmara de isolamento, tem-se um sistema de condensação dos gases, constituído por um conjunto de quatro *traps* (tubo de aço inox de diâmetro 2,5 cm e comprimento 15 cm) montados em série. Esses *traps* são submersos em água com gelo com temperatura aproximadamente de 6°C. Neste sistema ocorre a separação das frações líquida (condensável) e gasosa (incondensável). Os gases incondensáveis são descarregados para a atmosfera. O equipamento dispõe ainda de um painel de comando elétrico com uma chave geral, alimentação elétrica dos medidores de fluxo e controles de aquecimento do reator.

Em cada experimento foram usados cerca de 30 g de matéria-prima dentro do reator, com tempo de processamento de 30 min, contados a partir do momento em que a temperatura alcançou o valor programado para o experimento. Este tempo foi determinado como suficiente para as transformações termoquímicas em experimentos prévios, nos quais foi observada uma rampa de aquecimento de 20 min com patamar de 30 min na temperatura de operação. As massas dos produtos sólido e líquido foram determinadas através de medidas gravimétricas ao final de cada experimento e a massa do gás produzido foi calculada pela diferença entre a massa da matéria-prima usada e a soma das massas dos produtos sólido e líquido. Os rendimentos de cada produto foram calculados em termos percentuais com relação à massa de matéria prima usada, conforme a equação (1), na qual m_p é a massa de cada produto e m_i a massa de matéria prima, em gramas.

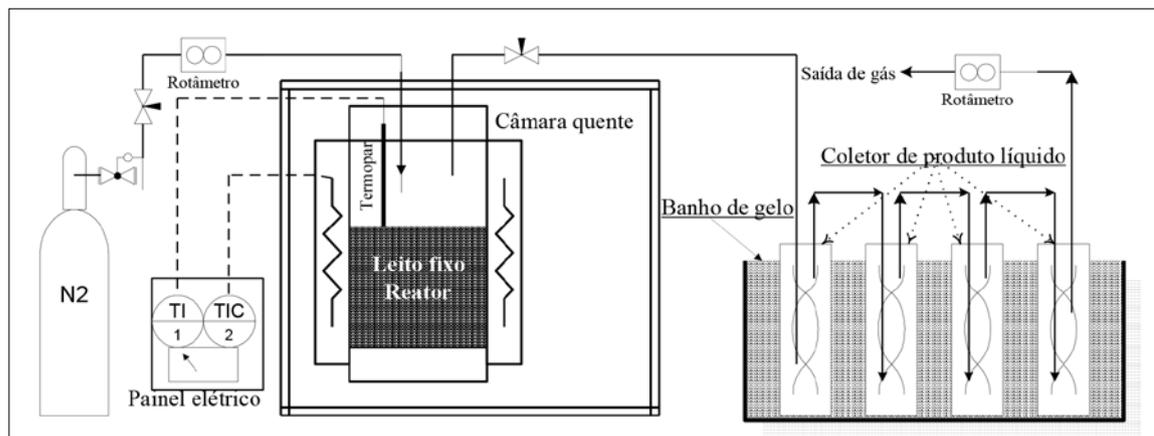


Figura 1. Esquema do aparelho de processamento térmico

Figure 1. Schematic overview of the processing apparatus

Os produtos sólidos obtidos nos experimentos, nas condições operacionais estudadas, foram submetidos à análise imediata, PCS e composição lignocelulósica, seguindo as metodologias usadas na caracterização da matéria prima.

Dos produtos líquidos foram determinados densidade, pelo método do picnômetro, índice de acidez pelo método ASTM D-664, pH por leitura direta em pHmetro (HANNA, HI221, Michigan, USA) e viscosidade pelo método ASTM 446, usando um viscosímetro Canon Fensk (QUIMIS, Q303SR26, Diadema, Brasil) a uma temperatura de 40°C. Além disso, foi feita a medida do PCS da fração não aquosa.

3 Resultados e Discussão

Para se obter produtos com capacidades energéticas elevadas através do processamento térmico de uma biomassa é de extrema importância o conhecimento das características físico-químicas da matéria-prima. No caso de material lignocelulósico como a TMD, uma característica determinante é a composição em termos de celulose, hemicelulose e lignina, que são os componentes majoritários. Na Figura 2 é mostrada a proporção destes três componentes na TMD estudada, na qual foi observado como maior teor o de celulose, componente que teoricamente se decompõe na faixa de temperatura de pirólise, de 500 a 600°C,

com possibilidades de formação de produtos líquidos de alto poder energético. Este resultado é compatível com os dados relatados por Shinoj et al. (2011), que obtiveram teores de celulose na faixa de 42 a 65% para o dendê.

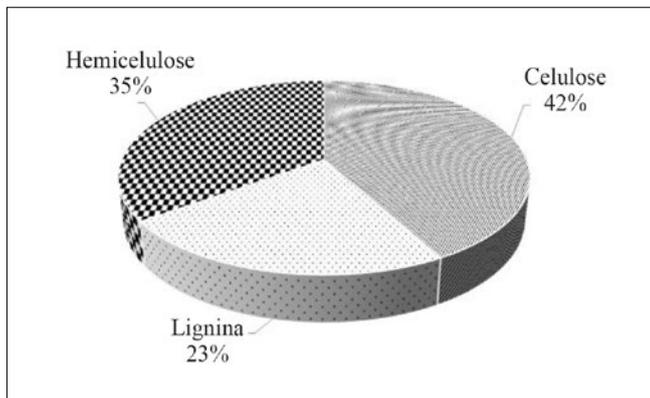


Figura 2. Composição dos componentes majoritários da TMD

Figure 2. Composition in major constituents of the OPMC

A análise imediata mostrou um alto teor de matéria volátil (MV), apontando a TMD como uma excelente matéria-prima para ser usada no processamento térmico para obtenção de produtos de maior potencial energético, mesmo tendo sido observado teor de carbono fixo (CF) baixo. Os resultados são mostrados na Tabela 1, confrontando os dados reportados

Tabela 1. Resultados da Análise Imediata da TMD

Table 1. Results of the OPMC proximate analysis

Matéria	TA (%)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	Autor
TMD	2,64±1,03	84,42±0,93	3,35±0,41	9,58±0,79	Presente trabalho
Cacho de Dendê	7,95	83,86	5,36	10,35	Sulaiman (2011)
TMD	7,92	71,84	4,28	16,00	Razuan (2011)
Bagaço de cana	4,42	81,66	5,10	8,82	Ortiz (2013)

Assim, é de se esperar que esta matéria prima produza cerca de 30% de produto sólido e 70% de produtos líquido e gasoso em um processamento térmico até 500°C. Para Thomsen et al. (2011), a hemicelulose e a celulose são os constituintes de biomassa que dão origem aos voláteis formados na pirólise, enquanto a lignina é responsável pela formação de “bio-carvão”.

No processo de transformação termoquímica, a proporção dos produtos formados na forma gasosa, líquida e sólida, os quais apresentam valor enérgico mais alto do que a própria matéria inicial, depende da temperatura e do tempo de operação.

A Figura 4 apresenta a configuração dos produtos obtidos nas temperaturas usadas no processamento térmico. Observa-se que o rendimento em produtos sólidos diminui com o aumento de temperatura, enquanto a produção de líquido e gás aumenta, havendo uma equiparação nas quantidades entre 450 e 500°C. Esse fenômeno ocorre devido ao comportamento da degradação dos componentes mais termodegradáveis – hemicelulose e celulose

por outros autores. O teor de água (TA) pode apresentar resultados diversificados porque o material recebido é submetido a uma secagem prévia para ser usado como matéria prima nos experimentos. Os resultados obtidos para MV e o CF apresentaram valores condizentes com a literatura reportada, apesar de poderem variar com o tempo de colheita e a variedade plantada.

O teor de cinzas (CZ) está coerente com o nível esperado para materiais vegetais, e compatível com o resultado de Razuan et al. (2011).

A análise termogravimétrica (ATG) é um método de alta precisão para embasar o estudo de pirólise a baixas velocidades de aquecimento, podendo fornecer informações sobre a cinética dos processos da reação. Na Figura 3 são apresentadas as curvas resultantes da TGA realizada na TMD, mostrando as curvas de perda de massa (TG) e de derivação de TG (DTG) com a temperatura. Os estágios estão diretamente relacionados à degradação térmica da hemicelulose, celulose e lignina, que constituem a biomassa lignocelulósica. A hemicelulose, devido ao seu caráter fortemente amorfo, decompõe-se em uma faixa de temperatura de 220 a 315°C e a celulose entre 315 e 400°C, tendo-se, até esse momento, uma perda de massa de 60%. A lignina, que apresenta uma estrutura altamente aromática e polimerizada, decompõe-se termicamente em uma faixa de temperatura mais alta, de 100 a 900°C (Yang et al., 2007). Na curva de DTG da TMD foram observados dois picos: a 290 e a 355°C, indicando as perdas máximas de massa de hemicelulose e celulose, respectivamente.

– somado ao aumento da conversão de lignina com o aumento da temperatura para formar os produtos líquidos e gasosos.

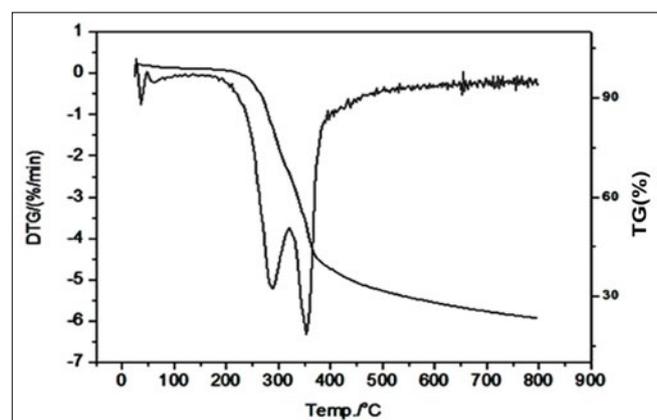


Figura 3. Resultado da análise térmica diferencial da TMD

Figure 3. Result of the OPMC thermal gravimetric analysis

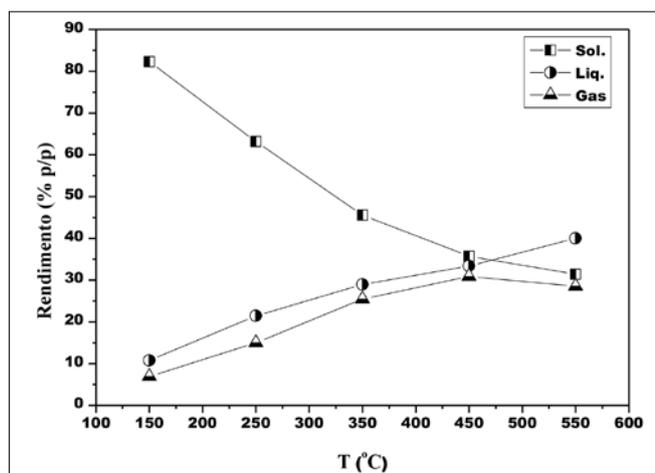


Figura 4. Rendimentos dos produtos formados no processamento térmico da TMD

Figure 4. Yields of the products from OPMC thermic processing

Na temperatura mais baixa, 150°C, há apenas a perda de água e de alguns componentes voláteis. Na faixa de temperatura de 250-350°C, a perda de massa já ocorre e se deve à decomposição dos três componentes principais – hemicelulose, celulose e lignina (segunda subestação). Acima desta temperatura a redução de massa sólida e o aumento de produto líquido se deve, principalmente, à decomposição da lignina, que é mais lenta com a formação de produtos orgânicos condensáveis. Os resultados têm demonstrado que o rendimento máximo, em produto líquido, ocorre em temperaturas acima de 450°C. Para Qu et al. (2011), a liberação da matéria volátil cresce rapidamente com o aumento da temperatura, produzindo um rendimento máximo de bio-óleo e, depois deste, diminuindo, mesmo com o aumento da temperatura.

A literatura tem mostrado que o rendimento de bio-óleo alcança os maiores valores nas temperaturas entre 400 e 550°C, e após essas temperaturas o rendimento diminui porque, nas temperaturas maiores que 600°C, o produto líquido é convertido em gás, devido às reações de cisões secundárias dominantes (Kan et al., 2016).

Na Tabela 2 são apresentadas as características físico-químicas dos produtos líquidos obtidos nas temperaturas usadas. Há um aumento da viscosidade com o aumento da temperatura, demonstrando que nas temperaturas baixas há uma predominância de água, mas que paulatinamente os componentes orgânicos formados vão tendo uma influência maior nesta propriedade. O mesmo se observa com o índice de acidez e com o pH, sendo que estas propriedades são mais afetadas nas temperaturas acima de 350°C.

Dos produtos líquidos obtidos nos cinco experimentos cujos rendimentos estão apresentados na Figura 4, aqueles relativos às temperaturas de 350, 450 e 550°C formaram duas fases quando resfriados a 5°C, tendo-se uma fração correspondente a 30% de produto semi-sólido de cor escura e os outros 70% de produto líquido incolor, aparentando ser fase aquosa. Foi medido o PCS da fração mais escura, que aparenta ser orgânica, obtendo-se valores de 32,5, 33,3 e 34,1 MJ/kg para os produtos obtidos a 350, 450 e 550°C, respectivamente.

Tabela 2. Características dos produtos líquidos

Table 2. Liquid products characteristics

Temperatura (°C)	Índice de Acidez (mgKOH/g)	Viscosidade (mm ² /s)	Densidade (kg/m ³)	pH
150	9,05±0,52	1,00±0,21	1163±0,81	2,30±0,12
250	11,85±0,48	1,15±0,12	1164±0,02	2,50±0,41
350	11,50±0,71	1,48±0,16	1163±0,73	2,89±0,08
450	14,38±0,39	1,80±0,07	1165±0,06	2,76±1,02
550	16,02±0,47	1,94±0,10	1165±0,02	3,48±0,32

Os resultados da análise imediata feita nos produtos sólidos permitiu observar a variação de MV, CF e CZ com a temperatura de processamento. Tomando-se como base a massa de TMD processada, pode-se observar na Figura 5 que a MV diminui enquanto o CF aumenta e a CZ permanece constante. Este comportamento está de acordo com dados da literatura, pois, com o aumento da temperatura, a liberação da matéria volátil é reduzida, passando a prevalecer reações de carbonização nas temperaturas mais altas (Plis et al., 2015).

Através das análises das composições lignocelósicas dos produtos sólidos obtidos, observou-se o grau de degradação dos componentes majoritários – celulose, hemicelulose e lignina – nas temperaturas de 150, 250, 350, 450 e 550°C. Constatou-se que a maior taxa de degradação da hemicelulose e da celulose ocorre nas temperaturas de 250 a 350°C, com uma redução acentuada na MV. Este comportamento era esperado pelo resultado da ATG e é condizente com os resultados reportados por Stefanidis et al. (2014), que mostram a degradação da hemicelulose na faixa de 250 a 350°C e da celulose entre 325 e 400°C. Após essa temperatura, o produto é constituído principalmente de lignina, que apresenta uma ampla faixa de degradação, como observado também por Williams e Besler (1996). Em relação ao produto resultante do processamento da TMD, a lignina se mostrou resistente em uma ampla faixa, iniciando sua degradação na faixa de 150°C, e se estendendo até as temperaturas maiores que 550°C.

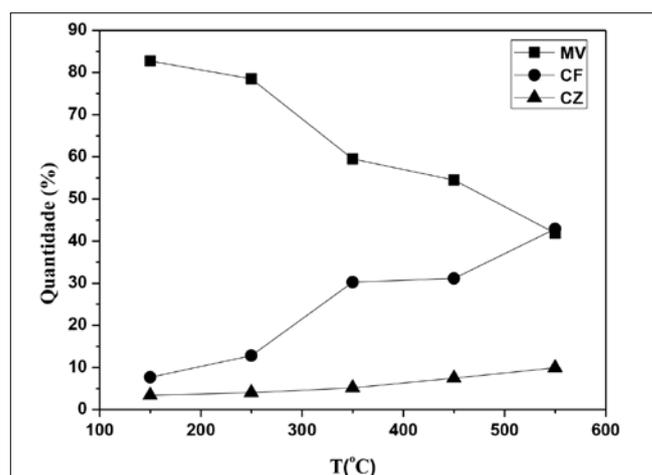


Figura 5. Comportamento das características dos produtos sólidos formados no processamento térmico da TMD

Figure 5. Behavior of the characteristics of solid products obtained in the OPMC thermic processing

Tabela 3 mostra o comportamento do PCS nos produtos sólidos. Observa-se um aumento acentuado já na temperatura de 250°C, indicando que a eliminação da água contida na biomassa já é suficiente para se ter um produto de boa qualidade energética. Acima desta temperatura, os produtos são de qualidade superior ao carvão obtido com outras matérias primas.

Tabela 3. Comparação do PCS com dados da literatura

Table 3. Comparison of the HVV with literature data

Matéria	PCS (MJ/kg)	Autor
TMD	22,05 ± 0,39	Presente trabalho
TMD	18,67 - 28	Razuan <i>et al.</i> (2011)
Bagaço de cana	18,89	Protásio <i>et al.</i> (2012)
Casca de arroz	16,176	Protásio <i>et al.</i> (2012)
Serragem	14,34	Prasityousil & Muenjina (2016)

4 Conclusão

O processamento termoquímico apresentou frações equivalentes de produto sólido, líquido e gasoso nas temperaturas de 450 e 550°C, tendo-se prevalência de produto sólido nas temperaturas mais baixas (250 e 350°C). Os produtos sólidos mostraram aumento significativo nos valores de carbono fixo e poder calorífico, evidenciando a viabilidade de utilização dos mesmos como coque siderúrgico, carvão ativado ou carvão vegetal para a produção de energia. Os produtos líquidos podem ser tratados e utilizados como matéria-prima para a síntese de outros produtos e, como possuem uma fração aquosa e uma fração oleosa, esta pode ser utilizada diretamente como combustível. Estes resultados mostraram que a transformação termoquímica da TMD é viável para a geração de produtos como carvão vegetal e bio-óleo, sendo, portanto, uma alternativa para a preservação do meio ambiente através da reutilização de matérias lignocelulósicas para a produção de biocombustíveis.

Referências

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000. doi: 10.1016/S1364-0321(99)00007-6

BRIDGWATER, A. V.; TOFT, A. J.; BRAMMER, J. G. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 6, p. 181-248, 2002. doi: 10.1016/S1364-0321(01)00010-7

COSTA, M. R. T.; HOMMA, A. K. O.; REBELLO, F. K.; SOUZA FILHO, A. P. S.; FERNANDES, A. L. C.; BALEIXE, W. *Atividade agropecuária no estado do Pará*. Brasília: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. 174 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/amazonia-oriental/publicações>. Acesso em: 21/03/2018.

GUEDES, C. L. B.; ADÃO, D. C.; QUESSADA, T. P.; BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; MAURO, E. D.; PÉREZ, J. M. M.; ROCHA, D. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010. doi: 10.1590/S0100-40422010000400003

HOSSAIN, A. K.; DAVIES, P. A. Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 21, n. C, p. 165-189, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.12.031

HUBER, G. W. S.; IBORRA, A. Corma synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts and engineering. *Chemical Reviews*, Washington, DC, v. 106, n. 9, p. 4044-4098, 2006. doi: 10.1021/cr068360d

KAN, T. N.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 57, n. C, p. 1126-1140, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.185

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil. A critical review. *Energy & Fuels*, Washington, DC, v. 20, p. 848-889, 2006. doi: 10.1021/ef0502397

ORTIZ, L. A.; SEGURA, N. F. J.; JABALERA, S. R.; PAULA, M. M.; CAMPO, D. A. E.; GUTIÉRREZ, S. J.; BRETADO, E. A. M.; MARTÍNEZ, C. V. Low temperature sugar cane bagasse pyrolysis for the production of high purity hydrogen through steam reforming and CO₂ capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, Amsterdam, v. 38, n. 28, p. 12580-12588, 2013. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.059

PLIS, A.; LASEK, J.; SKAWINSKA, A.; ZUWAŁA, J. Thermochemical and kinetic analysis of the pyrolysis process in *Cladophora glomerata* algae. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 115, n. C, p. 166-174, 2015. doi: 10.1016/j.jaap.2015.07.013

PROTÁSIO, T. P.; TONOLI, G. H. D.; JÚNIOR, M. G.; BUFALINO, L.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012. doi: 10.1590/S0104-77602012000300010

QU, T. T.; GUO, W. J.; SHEN, L. H.; XIAO, J.; ZHAO, K. Experimental study of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Washington, DC, v. 50, n. 18, p. 10424-10433, 2011. doi: 10.1021/ie1025453

RAZUAN, R.; FINNEY, K. N.; CHEN, Q.; SHARIFI, V. N.; SWITHENBANK, J. Pelletised fuel production from palm kernel cake. *Fuel Processing Technology*, v. 92, n. 3, p. 609-615, 2011. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.11.018

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012. DOI: 10.1590/S0100-40422012000500025

SHINOJ, S.; VISVANATHAN, R.; PANIGRAHI, S.; KOCHUBABU, M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: a review. *Industrial Crops and Products*, Oxford, v. 33, n. 3, p. 7-22. 2011. doi: 10.1016/j.indcrop.2010.09.009

STEFANIDIS, S. D.; KALOGIANNIS, K. G.; ILIOPOULOU, E. F.; MICHAÏLOF, C. M.; PILAVACHI, P. A.; LAPPAS, A. A. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 105, p. 143-150, 2014. doi: 10.1016/j.jaap.2013.10.013

SUBRAMANI, V. S.; GANGWAL, K. A review of recent literature to search for an efficient catalytic process for the conversion of syngas to ethanol. *Energy & Fuels*, Washington, DC, v. 22, n. 2, p. 814-839, 2008. doi: 10.1021/ef700411x

SULAIMAN, F.; ABDULLAH, N. Optimum conditions for maximising pyrolysis liquids of oil palm empty fruit bunches. *Energy*, Amsterdam, v. 36, n. 5, p. 2352-2359, 2011. doi: 10.1016/j.energy.2010.12.067

VAN SOEST, P. J. Use of detergents in the analyses of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of the Association of Official Analytical Chemistry*, Rockville, v. 46, p. 829-835, 1963.

VAN SOEST, P.J.; WINE, R.H. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. 4. Determination of plant cell wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemistry*, Rockville, v. 50, p. 50-55, 1967.

WILLIAMS, P. T.; BESLER, S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*, Amsterdam, v. 7, n. 3, p. 233-250, 1996. doi: 10.1016/0960-1481(96)00006-7

YANG, H. P. R.; YAN, H. P.; CHEN, D. H.; LEE, C. G.; ZHENG. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007. doi: 10.1016/j.fuel.2006.12.013

THOMSEN, T.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; BRUUN, E. W.; AHRENFELDT, J. *The potential of pyrolysis technology in climate change mitigation – influence of process design and –parameters simulated in SuperPro Designer Software*. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2011.

ZHANG, L.; LIU, R.; YIN, R.; MEI, Y. Upgrading of bio-oil from biomass fast pyrolysis in China: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 24, p. 66-72, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.027

Contribuição dos Autores: Orildo dos Santos fez a revisão bibliográfica, realizou os experimentos e a escrita científica; Nadia Corrêa auxiliou na elaboração da escrita, realizando correções, também auxiliou na apresentação e discussão dos resultados; Luiz França fez a orientação do trabalho e as correções finais.

Agradecimentos: Biopalma S. A. pelo fornecimento da matéria prima usada nos experimentos.

Fonte de Financiamento: Vale S. A. através do projeto de pesquisa BIOTHERM.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.