

AValiação dos Efeitos da Temperatura no Rendimento e Caracterização Física do Bio-Óleo Produzido a Partir da Pirólise do Bagaço de Cana

E. V. GONÇALVES¹, F. L. SEIXAS¹, M. H. N. O. SCALIANTE¹, M. L. GIMENES^{1*}

¹Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
*e-mail: marcelino@deq.uem.br

RESUMO

Este trabalho examinou a produção de bio-óleo a partir da pirólise em reator batelada de leito fixo do bagaço de cana. Os experimentos foram conduzidos com a variação da temperatura final de processo de 400 a 600 °C. Os resultados demonstraram que o rendimento dos produtos varia com a temperatura, sendo que a produção de líquido de pirólise aumenta com a elevação desta, atingindo seu máximo valor (53,3%) a 600 °C. A pesquisa também mostrou a importância da caracterização do bio-óleo para sua adequação a padrões e especificações do mercado. O líquido de pirólise apresentou como resultados teor de umidade de 17,32%, pH de 2,34, densidade de 1,05 g/cm³, viscosidades de 12,5 e 8,6 cP (a 25 e 40 °C), PCS de 17 MJ/kg e teor de cinzas de 0,04%.

1 INTRODUÇÃO

As repetidas crises mundiais que alardeiam as nações, em sentido geral, estão ligadas à escassez de vários recursos, especialmente da água potável, de alimentos e de fontes de energia. A situação momentânea manifesta, sistematicamente, uma dependência massificada de fontes não renováveis de energia, sobretudo dos combustíveis fósseis. Daí a busca acentuada por opções energéticas que assumam não só o compromisso de não esgotamento de suas reservas, ou seja, fontes renováveis de energia; mas que, ao mesmo tempo, sejam economicamente praticáveis e respeitem esforços ligados à proteção ambiental.

Diante desse quadro, várias pesquisas têm buscado solucionar o problema energético, especialmente as que fazem uso da pirólise. Este tipo de processo consiste na

decomposição termoquímica da biomassa em atmosfera inerte, resultando em 3 frações principais: líquido de pirólise, carvão que posteriormente pode ser queimado, ativado ou empregado em técnicas de melhoramento de solos (KUPPENS et al., 2014; MULLEN et al., 2010) e gases (óxidos de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos).

Inúmeras pesquisas realizadas ao longo dos últimos 30 anos descrevem o bio-óleo formado a partir da pirólise de biomassa como sendo um líquido marrom escuro (SEIXAS, 2014; MULLEN et al., 2010), com odor irritante (TSAI, LEE e CHANG, 2006; BRIDGWATER, 2012), com natureza química bastante complexa (contendo hidroxialdeídos, hidroxicetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e compostos fenólicos) (WRIGHT et al., 2010) e com elevadíssimo teor de compostos oxigenados, o que reduz seu potencial energético. Por isso é

importante ressaltar que tanto o rendimento quanto as características químicas e físicas do bio-óleo estão intimamente ligadas às variáveis de processo (umidade da biomassa, tamanho das partículas, pré-tratamento, configurações do reator, fornecimento de calor, transferência de calor, taxa de aquecimento, temperatura de reação e tempo de residência do vapor formado) (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006).

Pelo fato de o processo de pirólise ocorrer a altas temperaturas e de maneira bastante rápida, o bio-óleo apresenta muita instabilidade físico-química, pois seu conteúdo está fora do estado de equilíbrio e apresenta espécies bastante reativas. Desse modo, para ser empregado como combustível líquido, o bio-óleo precisa romper uma série de barreiras técnicas e de mercado e se adequar a especificações e normas de qualidade (SOLANTAUSTA et al., 2011; GARCÍA-PÉREZ, CHAALA e ROY, 2002) que estão diretamente relacionadas às suas características. As principais propriedades utilizadas para averiguar a estabilidade do bio-óleo são o pH, a viscosidade e o teor de água. Segundo Oasmaa e Peacocke (2001 apud Oasmaa et al., 2010) o teor de água do bio-óleo está intimamente ligado à densidade, à viscosidade e ao poder calorífico. A Tabela 1 evidencia os principais resultados da caracterização de bio-óleos advindos de diferentes condições de processo realizadas ao longo dos anos.

Tabela 1 – Propriedades comuns encontradas para bio-óleos derivados de madeira.

Propriedade Física	Valor Típico	
	Bio-óleo	Óleo Pesado
Teor de Umidade (%)	15-30	0,1
pH	2,5	-
Densidade (g/cm ³)	1,20	0,94
Viscosidade (a 500 °C) (cP)	40-100	180
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	16-19	40
Cinzas (%)	0-0,2	0,1

Fonte: Bridgwater (2003).

Inúmeras vantagens são relatadas por pesquisas que utilizam a pirólise da biomassa para a obtenção de energia e carvão. No que tange ao meio ambiente, é evidente que a disseminação do uso de combustíveis produzidos a partir da biomassa acarretará na diminuição da dependência de fontes não renováveis de energia; na neutralidade de dióxido de carbono emitido para a atmosfera durante a queima dos combustíveis, ocasionada por meio da incorporação do mesmo nos processos fotossintéticos das plantas; e na disposição final de resíduos de indústrias (madeira tratada), de colheitas (palhas especialmente) (BIBRZYCKI, KATELBACH-WOZNIK e SZLEK, 2014) e de florestas (OASMAA et al., 2010), de lodo de esgoto (PARK et al., 2010), de estrume de porco (KUPPENS et al., 2014) e de algas (RIZZO et al., 2014), dentre tantos outros.

Contudo, diante do que foi exposto até o momento e contando que no ano de 2014 as usinas de açúcar e álcool conjuntamente ofertaram no mercado mais de 186 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar (UDOP, 2015), este trabalho visa estudar a influência da variável temperatura no rendimento de bio-óleo obtido pelo processo de pirólise em reator de leito fixo e avaliar as propriedades físicas deste produto.

2 EXPERIMENTOS

2.1 Preparação do Bagaço

O bagaço cru foi gentilmente fornecido por uma usina da região com umidade de 24%. O preparo do bagaço se deu mediante secagem em estufa com circulação de ar a 65 °C por 24 h, trituração e peneiramento para a obtenção de partículas compreendidas entre 0,5 e 1,0 mm.

A análise termogravimétrica foi realizada com o propósito de melhor entender o processo de degradação térmica do bagaço de cana. As amostras (10 mg) foram

aconditionadas em cadinhos de platina e o experimento foi conduzido em um equipamento da marca Shimadzu TGA-50H, variando-se a temperatura de 25 a 900 °C, à taxa de aquecimento de 10 °C/min e com fluxo de N₂ de 30 mL/min. Por fim, antes de seu uso, as seguintes propriedades da biomassa foram determinadas: teor de umidade (Norma 12/IV do Instituto Adolfo Lutz), teor de cinzas (Norma 12/IV do Instituto Adolfo Lutz), teor de material volátil (Norma E872-82 da ASTM) e teor de matéria fixa. De acordo com Debouldi et al. (2005 apud Omoniyi e Olorunnisola, 2014) esta última propriedade é obtida por diferença.

2.2 Pirólise do Bagaço de Cana

Para a produção do bio-óleo, o bagaço de cana tratado (aproximadamente 47,0 g em batelada) foi pirolisado em um reator de leito fixo que está esquematizado na Figura 1. Além da variação da temperatura final nos patamares de 400, 450, 500, 550 e 600 °C, as outras variáveis de processo (fixadas) foram: taxa de aquecimento de 10 °C/min; vazão de N₂ de 200 ml/min; a mistura gasosa que saía do reator era conduzida por um condensador de serpentina resfriado a 3,5 °C; o produto líquido condensado foi coletado em um balão de fundo redondo mergulhado em banho de gelo mantido a 0 °C. Os rendimentos tanto do líquido de pirólise quanto do carvão foram calculados pela divisão de sua massa final recuperada pelo montante de bagaço alimentado inicialmente. O rendimento do gás foi estimado como que para completar os 100% de massa inicial da biomassa.

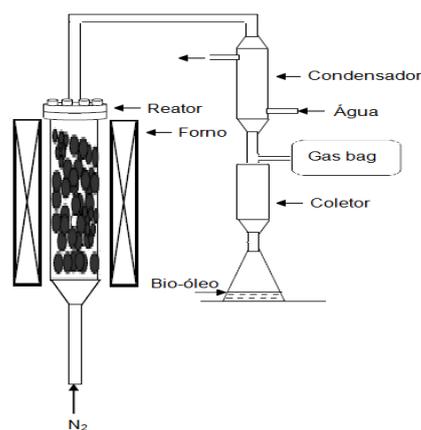
2.3 Caracterização do Bio-óleo

Para a caracterização física do líquido de pirólise foram determinadas: a viscosidade, o pH, o poder calorífico, o teor de água e o teor de cinzas.

O pH foi medido por meio de um pHmetro Digimed à temperatura ambiente de 20 °C. O teor de água presente no bio-óleo foi

obtido pelo método de Karl Fischer conduzido em um equipamento da marca OREON-AF8 e segundo a norma ASTM D-1744. O teor de cinzas foi determinado segundo a norma 18/IV do Instituto Adolfo Lutz. O valor da viscosidade aparente foi determinado por meio de um reômetro rotacional modelo RVDV III ULTRA produzido pela empresa Brookfield Engineering Laboratories. Para esta determinação utilizou-se um sensor SP40, variou-se a taxa de deformação até 1650 s⁻¹ e mantiveram-se temperaturas constantes de 25 e 40 °C (± 2 °C). Já o PCS foi determinado por uma bomba calorimétrica da marca Parr 6200.

Figura 1 – Desenho esquemático do Módulo Experimental de Pirólise.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da Biomassa

As propriedades físicas da biomassa estão apresentadas na Tabela 2.

O bagaço tratado mostrou 9,1% de umidade. Considerando que toda água presente no bagaço faça parte da composição final do bio-óleo, este resultado é condizente com o fato de que para se obter um bio-óleo estável e com uma única fase homogênea é necessário o emprego de uma biomassa com teor de umidade menor que 10% (LEHTO et al., 2010. De acordo com Asadullah et al.

(2007), maiores teores de água na biomassa geradora resultam em maiores porcentagens de água no bio-óleo, diminuindo dessa forma, o poder de combustão e o pH deste (TSAI, LEE e CHANG, 2006).

Tabela 2 – Resultados da Caracterização do Bagaço de Cana.

Propriedade	Valor
Teor de Umidade (%)	9,099 ± 0,406
Tamanho de Partícula (mm)	0,5-1,0
Densidade Aparente (g/cm ³)	0,10 ± 0,001
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	16,72
Análise Centesimal	
Fração Volátil (%)	76,586 ± 1,322
Carbono Fixo (%)	10,460 ± 2,277
Cinzas (%)	3,855 ± 1,809

A Tabela 2 mostra que o bagaço foi moído e peneirado para a obtenção de partículas entre 0,5 a 1,0 mm. A necessidade de altas taxas de aquecimento e de transferência de calor, normalmente exige a alimentação de biomassa finamente moída (< 1 mm) para a maximização do rendimento em bio-óleo (TSAI, LEE e CHANG, 2006; RADLEIN E QUIGNARD, 2013).

A determinação tanto da densidade aparente como do poder calorífico da biomassa são importantes, pois é por meio destes valores que é possível a comparação das densidades energéticas do bagaço e do líquido de pirólise. Para o caso em estudo foi constatado um valor de PCS de 16,72 MJ/kg e uma densidade aparente de 0,10 g/cm³ para o bagaço.

A análise centesimal do bagaço revelou valores de 76,6% para a fração volátil, 10,5% para fração de carbono fixo e 3,9% para o teor de cinzas. Isso está de acordo com o resultado encontrado pela Análise Termogravimétrica que está representada na Figura 2. Por esta figura é possível notar que a biomassa utilizada teve uma perda de massa de aproximadamente 10% para a temperatura de 100 °C, provavelmente relacionada à evaporação da água contida no material,

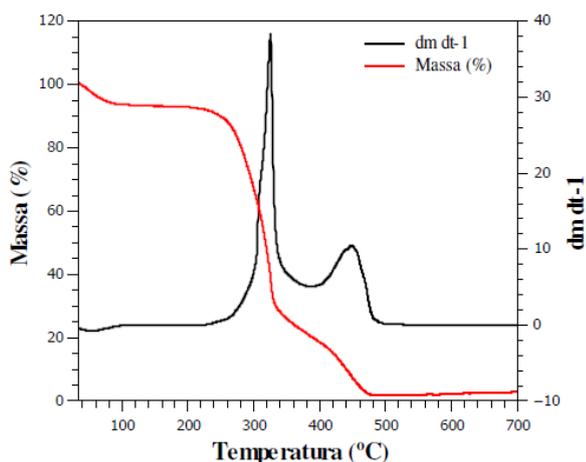
concordando com o resultado expresso (9,1%) na Tabela 2. A análise termogravimétrica também evidenciou que a maior taxa de decomposição da biomassa (63%) ocorreu entre as temperaturas de 250 e 350 °C. Percebe-se que entre 350 e 420 °C houve outra fase de taxa de decomposição contínua com perda de massa de 11%. Por fim, o restante do material (13%) foi decomposto da temperatura de 420 a 490 °C. A partir desta temperatura não houve mais perda de massa, indicando a presença de compostos inorgânicos na fração aproximada de 3%, o que está coerente com o resultado obtido de 3,9% (Tabela 2). Todos estes resultados tendem a comprovar os estudos reportados por Yang et al. (2007), no qual é demonstrado que: a decomposição da hemicelulose acontece facilmente e ocorre principalmente na faixa de temperatura de 220 a 315 °C; a degradação térmica da celulose ocorre principalmente em faixa de temperatura mais elevada que a hemicelulose (315 a 400 °C); a lignina é a estrutura de mais difícil decomposição, a qual normalmente ocorre de 150 até 900 °C e com menor taxa de perda de massa. Contudo, considerando que o material volátil é advindo principalmente da degradação térmica da hemicelulose e da celulose, a Figura 2 deixa claro que sua fração é de aproximadamente 74%. Já, o restante do carbono que dá origem ao carvão e que é derivado principalmente da lignina, pode ser chamado de carbono fixo e, como visto na Figura 2, tem o valor aproximado de 13%.

3.2 Efeito da Temperatura de Pirólise

Com a finalidade de se verificar a influência da variável temperatura, a pirólise do bagaço (47 g) foi conduzida à taxa de aquecimento de 10 °C/min, vazão de N₂ de 200 ml/min e temperaturas finais de 400, 450, 500, 550 e 600 °C com tempo de retenção de 1 h e 30 min. Estes valores de temperaturas finais de processo foram escolhidos baseados no resultado expresso pela Análise

Termogravimétrica, que demonstrou que a maior parte de material volátil fora decomposto principalmente a partir do patamar de 400 °C.

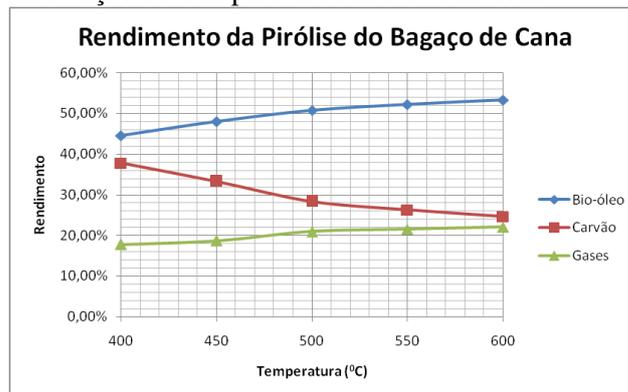
Figura 2 – Análise Termogravimétrica do Bagaço de Cana



Os resultados apresentados na Figura 3 mostram que à menor temperatura (400 °C) o rendimento em bio-óleo também foi o menor; indicando concordância com o que foi apresentado pela Análise Termogravimétrica, pois neste caso boa parte da fração do material só pode ser volatilizada a temperaturas maiores que 420 °C. Percebe-se com clareza que o aumento de rendimento em bio-óleo cresce com a elevação da temperatura até atingir nível máximo (53,3%) a 600 °C. Este comportamento é anormal, pois como afirma Bridgwater (2012) os resultados variam especialmente em decorrência da espécie de biomassa empregada e comumente o rendimento em líquido de pirólise apresenta nível máximo em torno de 480 a 520 °C. A pesquisa de Islam, Islam e Islam (2003) mostrou que a variação do rendimento em bio-óleo de bagaço de cana também pirolizado em um reator de leito fixo possui um perfil parabólico voltado para baixo com a maior produção de líquido de pirólise (49%) ocorrendo à temperatura de 450 °C. O mesmo perfil parabólico foi relatado na pesquisa de Asadullah et al. (2007) onde o maior

rendimento em bio-óleo (66,1%) foi obtido à temperatura de 500 °C. Desse modo, como ilustrado na Figura 3, o perfil ascendente do rendimento em bio-óleo até atingir 600 °C possui provável explicação baseada no fato de que os outros trabalhos mencionados envolveram taxas de aquecimento maiores (> 50 °C/min) do que a que foi utilizada neste estudo (10 °C/min). No entanto, a causa deste fenômeno deve ser investigada com maior atenção e cuidado, pois outras variáveis de processo como as dimensões dos reatores, os tamanhos das partículas da biomassa, a vazão de N₂ e o sistema de condensação e coleta também foram diferentes, podendo interferir diretamente nos resultados; e por isso serão alvos de análise em trabalhos futuros.

Figura 3 – Rendimento dos Produtos da Pirólise em Função da Temperatura Final de Processo.



Também expresso na Figura 3, a produção tanto do carvão quanto do gás também varia com a temperatura. É possível notar que o rendimento em carvão reduz com o aumento da temperatura e possui seu maior valor (37,8%) em 400 °C. Em contrapartida os resultados expressos para o gás possuem comportamento oposto. Neste caso o menor rendimento (17,7%) aconteceu a 400 °C. Estes comportamentos podem ser explicados pelo fato da dificuldade, em temperaturas menores, da ocorrência de reações secundárias que transformem moléculas voláteis mais pesadas em gases mais leves e da decomposição térmica do carvão.

3.3 Características do Bio-óleo

Para o uso do bio-óleo como combustível líquido aplicável a caldeiras, motores e turbinas há a necessidade do estabelecimento de padrões mínimos de qualidade relacionados principalmente a: estabilidade, homogeneidade, poder calorífico, pH, viscosidade, densidade e conteúdo de cinzas (MOHAN, PITTMAN e STEELE, 2006). Seguindo este direcionamento, as características físicas do bio-óleo obtido na condição de melhor rendimento (600 °C) estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da Caracterização Física do Bio-óleo produzido a 600 °C.

Propriedade Física	Valor
Teor de Umidade (%)	17,32
pH (20 °C)	2,34 ± 0,02
Densidade (20 °C) (g/cm ³)	1,045 ± 0,004
Viscosidade (25 e 40 °C) (cP)	12,5 e 8,6
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	16,97
Cinzas (%)	0,0393 ± 0,0681

Segundo esta tabela o bio-óleo apresentou um teor de umidade de 17,32%. Para Oasmaa e Peacocke (2001) o padrão de qualidade ideal para o uso do líquido de pirólise seria a apresentação de uma única fase e conseqüentemente um teor de água menor que 15%. Diante deste fato e observando a Figura 4, é possível notar que o líquido de pirólise aparenta possuir uma fase orgânica mais escura (marrom) envolta numa fase aquosa mais clara (amarelada). O aspecto visual do bio-óleo demonstra a tendência do início da separação de fases que pode ser explicado pelo seu teor de água (17,32%) maior que 15%. Além disso, de acordo com Asadullah et al. (2007), maiores teores de água na biomassa geradora resultam em maiores porcentagens de água no bio-óleo, diminuindo dessa forma, o poder de combustão e o pH deste (TSAI, LEE e CHANG, 2006).

Diretamente relacionados ao teor de água estão o PCS, a densidade e a viscosidade. O bio-óleo produzido apresentou densidade de 1,05 g/cm³, que é um valor maior do que da água. Esta condição permitiu ao líquido de pirólise possuir uma maior densidade energética. Desse modo foi constatado para o bio-óleo um PCS de 16,97 MJ/kg. Logo, em termos volumétricos, a densidade energética do líquido de pirólise, quando comparada à densidade energética do bagaço, expressa um valor aproximadamente 11 vezes maior. Isso justificaria a redução de custos com transporte caso o bio-óleo viesse a substituir ou concorrer com bagaço de cana no papel de matéria-prima para processos combustão, especialmente em motores estáticos (caldeiras, fornos, turbinas, entre outros).

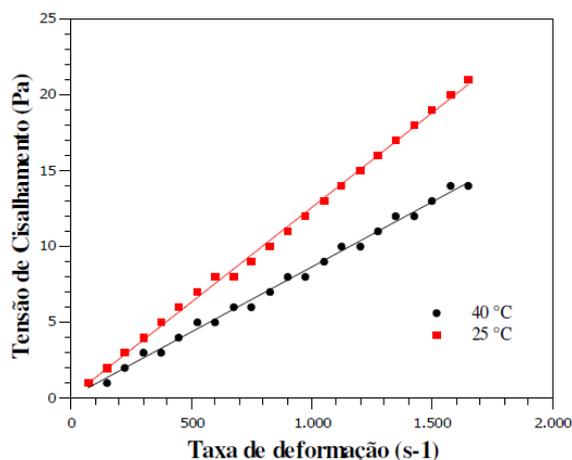
Figura 4 – Aspecto Visual do Bio-óleo preparado a 600 °C.



Os resultados mostrados na Tabela 3 para o valor da viscosidade (12,5 cP para 25 °C e 8,6 cP para 40 °C) foram determinados como sendo igual aos coeficientes angulares das retas ajustadas aos dados presentes na

Figura 5 e são relativamente baixos quando comparados a outros trabalhos. Asadullah et al. (2007) obtiveram do bagaço de cana duas frações de bio-óleo (leve e média) que expressaram como viscosidade aparente, à temperatura de 20 °C, 19,00 e 4,25 cP respectivamente. Por meio da Figura 5 é possível notar a existência de um comportamento aproximadamente linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, que é demonstrativo de característica de um fluido newtoniano. De acordo com Zhang, Shen e Liu (2007) a viscosidade de um líquido de pirólise reduz conforme maior for seu conteúdo de água e menor for o conteúdo de componentes insolúveis em sua fase aquosa. Segundo Bridgwater (2012) altos valores de viscosidade constantes nos líquidos de pirólise são responsáveis por: proporcionar grande queda de pressão nas tubulações, trazer dificuldade de atomização do bio-óleo para uso como combustível de transporte e aumentar os custos com equipamentos e bombas.

Figura 5 – Reogramas do Bio-óleo produzido a 600 °C.



Por sua vez, o bio-óleo mostrou um caráter ácido e seu pH foi determinado na faixa de 2,34. Segundo Oasmaa, Elliot e Korhonen (2010) os ácidos carboxílicos, apesar de possuírem caráter fraco (baixo

poder de dissolução em solução aquosa), são os principais causadores dos baixos valores encontrados para o pH dos líquidos de pirólise geralmente produzidos a partir das mais variadas fontes de biomassa. A pesquisa de García-Pérez, Chaala e Roy (2002) obteve líquido da pirólise à vácuo de bagaço de cana com pH de 2,7. Contudo, o valor do pH do bio-óleo necessita ser finamente monitorado, pois como afirma Bridgwater (2012), pode causar corrosão e incrustações nos vasos, bombas e demais equipamentos a que forem submetidos.

Por fim, por sua natureza não menos importante, o teor de cinzas obtido para o líquido de pirólise em questão foi de 0,04%. Cabe ressaltar a importância da determinação do teor de cinzas presente no bio-óleo, pois é um problema potencial o acúmulo dos resíduos e escórias deste, quando empregado em motores, turbinas e outros tipos de máquinas e equipamentos. A presença de cinzas no líquido de pirólise pode causar erosão, corrosão e incrustações de tal maneira que para aplicações em turbinas seu limite superior permitido seria de 0,1 % em massa (BOUCHER et al., 2000 apud GARCÍA-PÉREZ, CHAALA e ROY, 2002). Para Bridgwater (2012) os principais efeitos negativos da presença de cinzas no líquido de pirólise são: envelhecimento do óleo, sedimentação, entupimento de filtros, entupimento de catalisadores em processos de melhoramento, entupimento de injetores de motores à combustão e a aparição de metais alcalinos que catalisam reações secundárias indesejadas. Visto que os óleos combustíveis pesados praticados comercialmente expressam porcentagens de cinzas menores que 0,1 % (CZERNICK e BRIDGWATER, 2004), o teor de cinzas encontrado neste trabalho evidencia um excelente resultado.

Contudo, de uma maneira geral, o bio-óleo produzido atende à maioria das especificações técnicas reportadas pelo trabalho de Oasmaa e Peacocke (2001) sendo

propício seu uso em caldeiras e motores a diesel.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a produção de bio-óleo a partir da degradação térmica de bagaço de cana em um reator de leito fixo variando-se a temperatura de processo de 400 a 600 °C. Os resultados constataram que o aumento da temperatura acarreta na elevação do rendimento em bio-óleo, o qual exibiu nível máximo de 53,3% à temperatura de 600 °C. Por fim, o conjunto de algumas das propriedades físicas do líquido de pirólise foi caracterizado, e em sua maioria, com exceção do teor de umidade, atenderam a uma série de exigências e especificações para que este possa apresentar qualidade suficiente para ser empregado como combustível líquido.

NOMENCLATURA

PCS – Poder Calorífico Superior

REFERÊNCIAS

ASADULLAH, M.; RAHMAN, M.A.; ALI, M.M.; RAHMAN, M.S.; MOTIN, M.A.; SULTAN, M.B.; ALAM, M.R.. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. **Fuel**, v.86, p.2514–2520, 2007.

ASTM International. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. E872-82 (Reapproved 2013).

BIBRZYCKI, Jakub; KATELBACH-WOZNIAK, Anna; SZLEK, Andrzej. Investigation of biomass blending on pyrolysis process using TGA-FTIR technique. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, v.37, 2014.

BRIDGWATER, A. V.. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v.91, p. 87-102, 2003.

BRIDGWATER, A. V.. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v.38, p.68-94, 2012.

CZERNICK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. **Energy & Fuels**, v.18, p.590-598, 2004.

GARCÍA-PÉREZ, Manuel; CHAALA, Abdelkader; ROY, Christian. Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. **JOURNAL of ANALYTICAL and APPLIED PYROLYSIS**, v.65, p.111-136, 2002.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985. p. 21-22.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985. p. 27-28.

ISLAM, Mohammad Rofiqul; ISLAM, Md. Nurul; ISLAM, Mohammad Nurul. FIXED BED PYROLYSIS OF SUGARCANE BAGASSE FOR LIQUID FUEL PRODUCTION. **International Conference on Mechanical Engineering**, Dhaka, Bangladesh, 2003.

KUPPENS, Tom; VAN DAEL, Miet; VANREPPELEN, Kenny; CARLEER, Robert; YPERMAN, Jan; SCHREURS, Sonja; VAN PASSEL, Steven. Techno-Economic Assessment of Pyrolysis Char Production and Application – A Review.

**CHEMICAL ENGINEERING
TRANSACTIONS**, v.37, 2014.

LEHTO, Jani; OASMAA, Anja; SOLANTAUSTA, Yrjö; KYTÖ, Matti; CHIARAMONTI, David. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. **VTT TECHNOLOGY** **87**, Espoo, 2013.

MEIER, Dietrich; BELD, Bert van de; BRIDGWATER, Anthony V.; ELLIOT, Douglas C.; OASMAA, Anja; PRETO, Fernando. State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.20, p. 619-641, 2013.

MOHAN, Dinesh; Jr., Charles U. Pittman; STEELE, Philip H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. **Energy & Fuels**, v.20, p. 848-889, 2006.

MULLEN, Charles A.; BOATENG, Akwasi A.; GOLDBERG, Neil M.; LIMA, Isabel M.; LAIRD, David A.; HICKS, Kevin B. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. **BIOMASS AND BIOENERGY**, v. 34, p. 67-74, 2010.

OASMAA, Anja; ELLIOT, Douglas C.; KORHONEN, Jaana. Acidity of Biomass Fast Pyrolysis Bio-oils. **Energy & fuels**, v.24, p. 6548-6554, 2010.

OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y.; VESA, A.; KUOPPALA, E.; SIPILÄ, K.. Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues. **Energy & Fuels**, VOL. 24, p. 1380-1388, 2010.

OMONIYI, T. E.; OLORUNNISOLA A. O.. Experimental Characterisation of Bagasse Biomass Material for Energy Production. **International Journal of Engineering and Technology**, v.4, No. 10, 2014.

PARK, Hyun Ju; HEO, Hyeon Su; PARK, Young-Kwon; YIM, Jin-Heong; JEON, Jong-Ki; PARK, Junhong; RYU, Changkook; KIM, Seung-Soo. Clean bio-oil production from fast pyrolysis of sewage sludge: Effects of reaction conditions and metal oxide catalysts. **Bioresource Technology**, v.101, p. S83-S85, 2010.

RADLEIN, D.; QUIGNARD, A.. A Short Historical Review of Fast Pyrolysis of Biomass. **Oil & Gas Science and Technology**, v.68, p. 765-783, 2013.

RIZZO, Andrea Maria; BETTUCCI, Lorenzo; MARSILI-LIBELLI, Ilaria; CHIARAMONTI, David. Effect of Feedstock Composition on Quality, Yield and Properties of Pyrolysis Oil from Three Microalgae Species. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**. v.37, 2014.

SEIXAS, Fernanda Lini. **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA APLICAÇÃO NA CLARIFICAÇÃO DA VINHAÇA**. 2014. 175p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

SOLANTAUSTA, Y.; OASMAA, A.; SIPILÄ, K.; LINDFORS, C.; LEHTO, J.; AUTIO, J.; JOKELA, P.; ALIN, J.; HEISKANEN, J.. Bio-oil Production from Biomass: Steps toward Demonstration. **Energy & Fuels**, v.26, p. 233-240, 2012.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHANG, Y.M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. **JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS**, v.76, p. 230-237, 2006.

UDOP. União dos Produtores de Bioenergia. **Boletim de Conjuntura Energética**.

Disponível em:
<http://www.udop.com.br/download/estatistica/biomassa/2014_balanco_bagaco_cana_uso_energetico.pdf>. Acesso em: 2 jun. de 2015.

WRIGHT, Mark M.; SATRIO, Justinus A.; BROWN Robert C.; DAUGAARD, Daren E.; HSU, David D. Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels. **National Renewable Energy Laboratory**, Golden, Colorado, USA, 2010.

YANG, Haiping; YAN, Rong; CHEN, Hanping; LEE, Dong Ho; ZHENG, Chuguang. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, p. 1781-1788, 2007.

ZHANG, Le; SHEN, Chenjie; LIU, Ronghou. GC-MS and FT-IR analysis of the bio-oil with addition of ethyl acetate during storage. **Frontiers in ENERGY RESEARCH**, v.2, art. 3, 2014.

AGRADECIMENTOS

Agrademos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo apoio financeiro, à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) pela estrutura concedida e à Usina de Açúcar e Alcool Santa Terezinha Ltda, localizada na cidade de Iguatemi-PR, pelo fornecimento do material (bagaço) utilizado na realização dos experimentos.