



## Torrefação de madeira em reator elétrico vibracional em escala piloto

Luciane Batistella<sup>1</sup>; Sulema Mufarrej<sup>2</sup>; Michele Di Domenico<sup>3</sup>; Patrick Rousset<sup>4</sup>;  
Manoel F. M. Nogueira<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Sul e Sudoeste do Pará (luciane.batistella@unifesspa.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Pará (sulemamufarrej@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná (micheled@utfpr.edu.br)

<sup>4</sup> CIRAD Centro Internacional de Cooperação em pesquisa Agrônômica e para o  
Desenvolvimento (patrick.rousset@cirad.fr)

<sup>5</sup> Universidade Federal do Pará (mfmn@ufpa.br)

### Resumo

A torrefação é considerada um método de pré-tratamento da biomassa que visa melhorar suas características físico-químicas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características dos diferentes produtos gerados no processo de torrefação de madeira (sólido e gases) em um reator elétrico vibracional em escala piloto (TEV), para desenvolver um processo capaz de produzir pó de biomassa com alta densidade energética. As reações de torrefação foram realizadas nas temperaturas de 220, 250 e 280 °C, com um tempo de residência no reator TEV de 30 min. De acordo com a análise imediata do produto sólido, o aumento da temperatura de torrefação conduziu ao aumento do teor de carbono fixo e a uma redução significativa no teor de material volátil. Ainda, de acordo com análise elementar, o aumento da temperatura promoveu uma diminuição dos teores de hidrogênio e oxigênio e um aumento no teor de carbono. As mudanças nas concentrações ocorreram devido à perda de umidade e de outros compostos voláteis que compõem a hemicelulose, a celulose e a lignina. Como resultado, foi observado o aumento da densidade energética da madeira torrada em comparação com a madeira não tratada. O gás produzido em maior concentração para todas as temperaturas de torrefação foi o CO<sub>2</sub>, com um aumento significativo de sua concentração com o aumento da temperatura, de 6,7 para 54,3% mol/mol.

Palavras-chave: Energia renovável, madeira, torrefação, CO<sub>2</sub>.

Área Temática: Energia e energias renováveis.

## Torrefaction of wood in a vibrational electric reactor in pilot scale

### Abstract

*Torrefaction is considered a method of pre-treatment of biomass that aims to improve its physicochemical characteristics. In this sense, the objective of this work was to evaluate the characteristics of the different products generated in the process of wood torrefaction (solid and gases) in a pilot scale vibrational electric reactor (TEV), to develop a process capable of produce biomass powder with high energy density. The torrefaction reactions were performed at temperatures of 220, 250 and 280 °C, with a residence time of 30 min in the TEV reactor. According to the proximate analysis of the solid product, an increase in the torrefaction temperature led to an increase in the fixed carbon content and a significant reduction in the volatile matter content. Also, according to the ultimate analysis, the increase in temperature promoted a decrease in the contents of hydrogen and oxygen and an increase in the carbon content. Changes in concentrations occurred due to the loss of moisture and other volatile compounds from hemicellulose, cellulose and lignin. As a result, it was observed an increase in the energy density of torrefacted wood in comparison to the untreated wood. The gas produced in higher concentrations for all torrefaction temperatures was the CO<sub>2</sub>, with a significant increase in its concentration by increasing temperature, from 6.7 up to 54.3% mol/mol.*

*Key words: Renewable energy, wood, torrefaction, CO<sub>2</sub>.*

*Theme Area: Energy and renewable energies.*



## 1 Introdução

Os combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e o gás natural, têm sido a principal fonte de energia primária utilizada no mundo inteiro. No entanto, o uso excessivo de combustíveis fósseis tem apresentado sérios problemas ambientais, como emissão de gases do efeito estufa, alterações climáticas e desequilíbrio ecológico.

Uma das principais estratégias para garantir a demanda energética sem comprometer os recursos naturais existentes é o uso de biomassa como fonte de energia renovável. Os resíduos florestais são exemplos de biomassa, sendo gerados por operações como o manejo florestal e beneficiamento da madeira (cascas, resíduos de serrarias e indústrias de chapas de madeira) (VIRMOND et al., 2013). Estes resíduos que não são utilizados podem deixar de ser um passivo ambiental, sendo processados como matéria-prima para geração de energia e produção de produtos de maior valor agregado.

Apesar dos benefícios da utilização de biomassa em processos térmicos, a sua aplicação tem uma grande limitação em projetos que envolvem elevados fluxos de biomassa. Características como, a elevada umidade e baixa densidade, valor calórico relativamente baixo e custo de transporte caro, reduzem a viabilidade do uso direto da biomassa. Neste sentido, o processo de torrefação vem sendo investigado com o objetivo de melhorar as características físico-químicas da biomassa. Assim, obter um combustível homogêneo e de alta densidade energética útil para outras conversões termoquímicas (HILL; GRIGSB; HALL, 2013; NANOU; CARBO; KIEL, 2016; THÀNH et al., 2015).

A torrefação, também chamada de pirólise moderada, é um processo térmico realizado em ambiente inerte ou semi-inerte e normalmente sob condições atmosféricas, onde a biomassa é aquecida a 200 a 300 °C (ROUSSET et al., 2011). O processo de torrefação gera o produto sólido, líquido e gases, sendo o produto sólido de maior interesse. O sólido torrado quando comparado à biomassa *in natura* (bruta), tem maior densidade e poder calorífico. O sólido torna-se hidrofóbico, sofrendo pouca influência da umidade do ambiente em que se encontra. A friabilidade do material é melhorada, facilitando o processo de moagem ou cominuição, com redução de 70% a 90% da demanda energética necessária para a cominuição de biomassa não tratada (ROUSSET et al., 2011). A fração restante do processo de torrefação é liberada na forma de voláteis condensáveis (principalmente água, produtos orgânicos e lipídios), e não-condensáveis ou gases permanentes (CO e CO<sub>2</sub>) (THÀNH et al., 2015). Os voláteis produzidos durante a torrefação podem ser queimados para proporcionar uma fonte de energia adicional ou então, utilizados na produção de compostos químicos, agregando valor econômico ao processo de torrefação (NANOU; CARBO; KIEL, 2016).

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as características físicas e químicas dos produtos gerados (sólido e gases) no processo de torrefação de madeira em um reator elétrico vibracional em escala piloto, com a intenção de desenvolver um processo capaz de produzir pó de biomassa com alta densidade energética.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Amostra

A amostra de madeira selecionada para estudo do processo de torrefação foi a Cupiúba, cujo nome científico é *Goupia glabra* Aubl. da família *Goupiaceae*, obtida no Pará (BR). A madeira foi triturada em forma de chips para ser utilizada no processo de torrefação. As amostras submetidas às análises de caracterização foram moídas e classificadas em 35 mesh (retidas em 60 mesh). A análise elementar (teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre) das amostras foi realizada de acordo com as normas ASTM E777 (ASTM, 2008) e ASTM E778 (ASTM, 2008) utilizando um analisador elementar (Elemental Analyzer 2400 CHN Perkin-

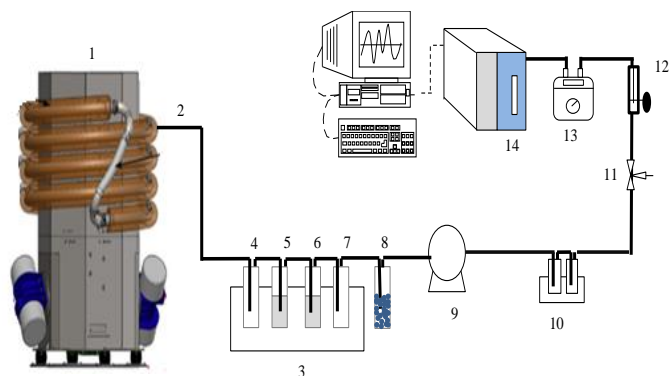


Elmer Series II - USA). O teor de oxigênio foi calculado pela diferença entre o somatório do teor de C, H, N, S e cinzas. Por meio da análise imediata, foram determinados os teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo do sólido. Esta análise foi realizada de acordo com a metodologia descrita pelas normas CEN/TS 14774-1 (2004), CEN/TS 15148 (2005) e CEN/TS 14775 (2004). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado segundo a norma ASTM E711 (ASTM, 2004), utilizando uma bomba calorimétrica (IKA - WERKE, modelo C2000). O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado com base na análise elementar.

## 2.2 Ensaios de torrefação da biomassa

Os testes de torrefação foram realizados em um reator e elevador elétrico vibracional em escala piloto chamado de TEV (*Vibrating Electrical Elevator and Reactor*) (REVTECH - *Research and Development Department*, França). O esquema do reator de torrefação TEV e do aparato de coleta dos gases está mostrado na Figura 1. O reator é composto por uma matriz metálica octogonal envolvida externamente por um tubo em espiral de aço inoxidável com 88,9 mm de diâmetro externo e 21 m de comprimento que fazem quatro voltas. Os chips de madeira circulam dentro do tubo em espiral devido à vibração induzida por dois motores agitadores *off-balance*. Três parâmetros dos motores foram fixados em 45° de ângulo de ataque do motor, 95% de posição dos pesos excêntricos e 50 Hz de frequência de rotação dos motores, para definir o tempo de residência das partículas no interior da espiral em 54 segundos para cada volta. O tubo em espiral está ligado a um transformador de potência que, por sua vez, fornece o aquecimento pela passagem de corrente elétrica na parede do tubo (calor por efeito Joule). Os chips de madeira são aquecidos devido ao seu contato com o tubo quente.

Figura 1 – Esquema do reator elétrico vibracional e do sistema de coleta e análise dos gases



Legenda: (1) reator de torrefação TEV; (2) linha de amostragem de gás; (3) banho termostático (-5 °C); (4 e 7) garrafas lavadoras de gases vazias; (5 e 6) garrafas lavadoras de gases com isopropanol; (8) garrafa com sílica gel; (9) bomba; (10) filtros; (11) válvula de ajuste fino; (12) rotâmetro; (13) medidor de gás seco, (14) analisador de gases.

A torrefação da madeira Cupiúba utilizando o reator e elevador elétrico vibracional em escala piloto (TEV) foi avaliada durante um tempo de residência de 30 min e temperaturas de 220, 250 e 280 °C. Para cada teste de torrefação foram alimentados no reator 10 kg de madeira em formato de chips previamente secos (2-4% de umidade). O aquecimento do reator foi realizado a uma taxa de 15 °C·min<sup>-1</sup>, sendo necessário entre 15 e 20 min para atingir a temperatura de trabalho fixada.

A amostragem dos gases permanentes foi realizada na quarta espiral do reator de torrefação, como apresentado na Figura 1. Os gases permanentes foram analisados de modo online utilizando o micro-GC (Agilent Technologies, Varian CP-4900). O cromatógrafo possui detectores TCD e duas colunas cromatográficas (Molsieve 5 Å e Poraplot Q) para medida da concentração de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. O micro-GC foi operado com gás hélio como gás de arraste sob pressão de 100 kPa, temperatura das colunas e injetor mantidos em 90 °C e detector em 100 °C.



### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Caracterização do sólido

Os resultados da análise imediata, elemental e poder calorífico do material sólido obtido a partir da avaliação de três torrefações estão apresentados na Tabela 1, incluindo a madeira bruta para comparação. Em relação aos efeitos da torrefação na análise imediata, o aumento da temperatura de torrefação causou aumento do teor de carbono fixo, enquanto a matéria volátil foi significativamente reduzida. Depois de submeter à madeira em temperatura mais severa (280 °C), o carbono fixo aumentou 67% e a matéria volátil diminuiu 16%. O alto teor de carbono fixo indica que a biomassa torrada é capaz de produzir uma alta quantidade de calor em processos de combustão (ROUSSET et al., 2011). A influência da temperatura foi mais visível nas torrefações realizadas em 250 e 280 °C devido à decomposição da hemicelulose.

Tabela 1. Resultados das análises imediata, elemental e poder calorífico das amostras de madeira bruta e torradas em 220, 250 e 280 °C durante 30 min

Caracterização	Madeira bruta	220 °C	250 °C	280 °C
Análise imediata [% ,b.s. <sup>a</sup> ]				
Umidade [% , bruta]	3,92	0,28	0,33	0,12
Matéria volátil	82,99	80,91	78,04	71,48
Carbono Fixo	16,65	18,64	21,47	27,87
Cinzas	0,37	0,45	0,49	0,65
Análise elemental [% , l.u.c <sup>b</sup> ]				
C	49,27	52,20	54,41	57,44
H	7,85	5,95	5,76	5,65
N	0,19	0,15	0,20	0,14
O	42,67	41,69	39,62	36,75
H/C <sup>c</sup>	1,91	1,36	1,27	1,18
O/C	0,65	0,59	0,54	0,48
PCS [bs, MJ kg <sup>-1</sup> ]	19,36	20,56	21,09	21,54
PCI [bs, MJ kg <sup>-1</sup> ]	17,64	19,25	19,83	20,29

<sup>a</sup> Base seca; <sup>b</sup> Livre de umidade e cinzas; <sup>c</sup> Razão atômica.

Os resultados quanto à análise elemental (C, H, N e O) demonstraram que o aumento da temperatura de torrefação eleva o teor de carbono e diminui as concentrações de oxigênio e hidrogênio. A amostra de madeira avaliada apresenta baixo teor de nitrogênio, e este, não alterado durante a torrefação. O aumento no teor de carbono ocorre devido à perda de umidade e de outros compostos voláteis, tais como ácido acético, metanol, aldeídos e cetonas (THÀNH et al., 2015; CHIOU et al., 2016).

O decréscimo dos teores de hidrogênio e oxigênio da madeira torrada resulta em menores razões de H/C e O/C (Tabela 1). Uma possível explicação para este comportamento é a eliminação do radical hidroxila (-OH) presente nos polissacarídeos como a hemicelulose. O radical hidroxila é altamente reativo e consequentemente, é facilmente liberado com o aumento da temperatura de torrefação (NGUILA INARI et al., 2007). As semelhanças entre as razões atômicas da madeira torrada em 280 °C e do carvão sub-betuminoso (H/C: 1,13 e O/C: 0,64) demonstram o potencial de aplicação da biomassa torrada em processos de co-combustão e gaseificação (PHANPHANICH & MANI, 2011; TUMULURU et al., 2011).

O poder calorífico da madeira apresentou um aumento de 10% com a temperatura de torrefação. Uma das mais importantes propriedades melhoradas no processo de torrefação é o aumento da densidade energética da madeira torrada em comparação com a madeira não tratada. O aumento do poder calorífico pode estar relacionado com a decomposição de parte dos

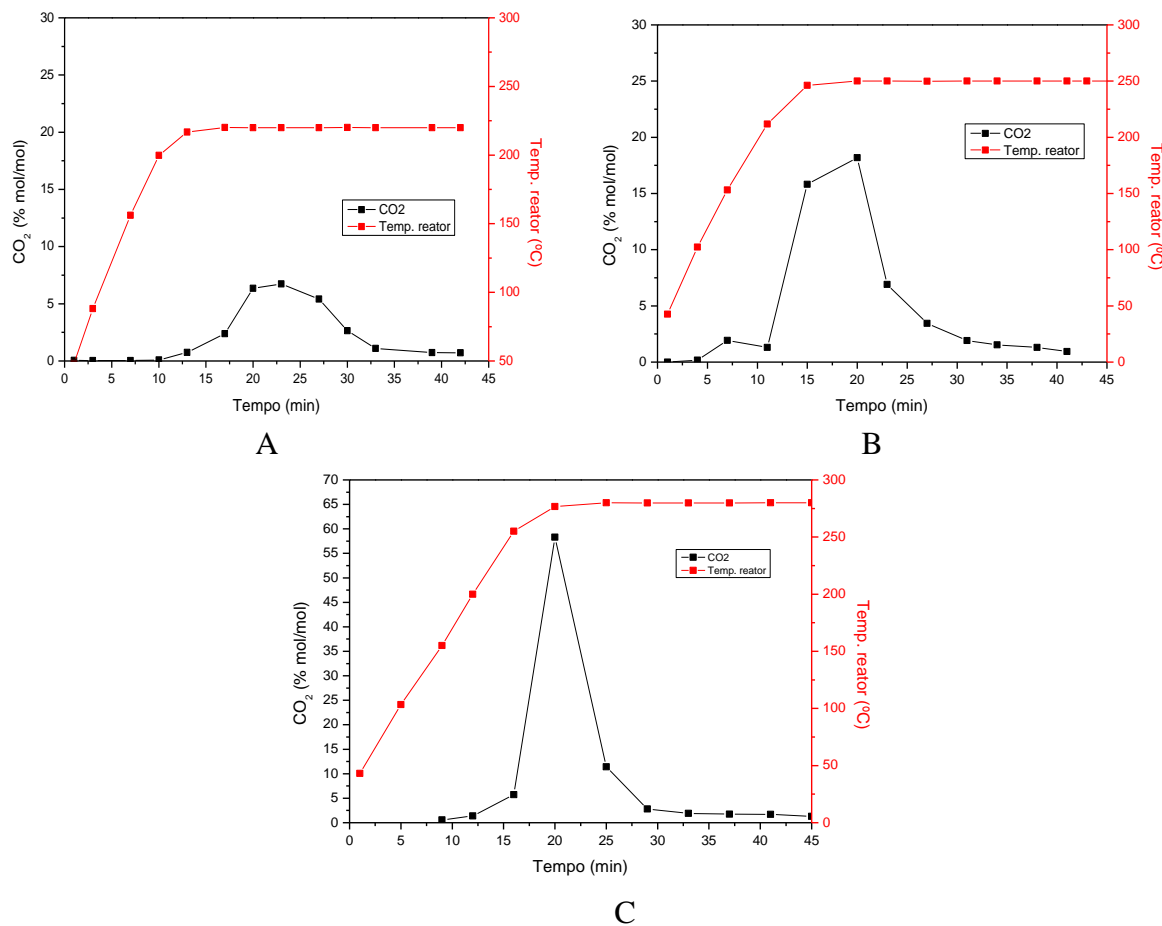


compostos de baixa densidade energética que compõem a madeira, como a hemicelulose ( $13,6 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) e celulose ( $18,6 \text{ MJ kg}^{-1}$ ), enquanto que, a fração de lignina com alto poder calorífico ( $27 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) permanece parcialmente ou totalmente inalterada (VALIX; KATYAL; CHEUNG, 2017). Quanto maior o teor de lignina e extrativos mais alto é o poder calorífico, devido a estes compostos conter menos oxigênio do que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose). Portanto, perde-se relativamente mais massa do que a energia devido à perda de vapor de água e dióxido de carbono que apresentam baixo poder calorífico (PRINS et al., 2006).

### 3.2 Gases não condensáveis

Os resultados das emissões de  $\text{CO}_2$  analisadas durante a torrefação de madeira a 220, 250 e 280 °C são mostrados na Figura 2. O gás  $\text{CO}_2$  foi o componente produzido em maior concentração em todas as temperaturas de torrefação. A concentração de  $\text{CO}_2$  aumenta exponencialmente até formar um pico, em seguida apresenta um comportamento decrescente. A formação de  $\text{CO}_2$  durante a torrefação é decorrente da despolimerização e descarboxilação de grupos ácidos ( $-\text{COOH}$ ) e acetil da hemicelulose (THÀNH et al., 2015). A concentração de  $\text{CO}_2$  aumentou com o incremento da temperatura de torrefação, de 6,7 para 54,3% mol/mol, este comportamento indica que grande parte da hemicelulose foi degradada em alta temperatura de torrefação. Outros gases como, o metano ( $\text{CH}_4$ ), etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) também foram detectados durante a torrefação, e apresentaram baixas concentrações.

Figura 2 – Concentração de  $\text{CO}_2$  em função do tempo e temperatura de torrefação coletados durante o teste a 220 °C (A), 250 °C (B) e 280 °C (C)



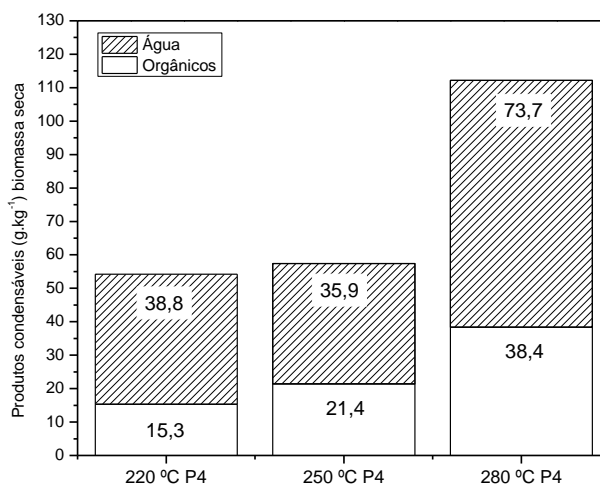




### 3.3 Gases condensáveis

Na torrefação, o principal produto condensável é a água, que é liberada durante a evaporação da umidade e reações de desidratação entre as moléculas orgânicas, liberando a água ligada. Os resultados mostrados na Figura 3 confirmam a maior quantidade de água liberada em comparação aos produtos orgânicos condensáveis. A concentração de condensáveis aumenta com o aumento da temperatura de torrefação. Em alta temperatura a madeira sofre desidratação e degradação de seus constituintes, liberando a água fortemente ligada e compostos orgânicos menores.

Figura 3. Quantidade em ( $\text{g kg}^{-1}$ ) de produtos condensáveis coletados no Ponto 4 do reator de torrefação



Em relação aos compostos orgânicos condensáveis, um total de 41 componentes foram identificados por cromatografia gasosa (GC-MS). No entanto, isto representa apenas uma fração dos componentes orgânicos produzidos e que foram condensados. As amostras de condensados resultantes das torrefações realizadas em 220 e 250 °C apresentaram composição semelhante. Nestas temperaturas, foram detectados principalmente alcoóis, cetonas, ácido acético e furanos e poucos compostos fenólicos. Estes componentes são derivados principalmente da decomposição de hemicelulose na madeira. No condensado formado na torrefação da madeira a 280 °C destacam-se, os aldeídos, metanol, etanol, ácidos carboxílicos (ácido acético e propanóico), fenóis (4-etilguaiacol, acetileugenol), furfural e levoglucosan. A detecção de compostos fenólicos foi maior com o aumento da temperatura de torrefação. Os fenóis são produtos da decomposição da lignina, e são mais evidentes quando se utiliza madeiras duras, que é o caso da nossa amostra. Os açúcares são produtos da despolimerização da celulose, que ocorre entre 250-280 °C. Entre os diversos açúcares, o Levoglucosan é o principal, sendo identificado apenas no material condensado da torrefação realizada a 280 °C. A análise dos condensados demonstrou que a alta temperatura de torrefação leva a um aumento de compostos orgânicos detectáveis por GC-MS, provavelmente devido a uma maior decomposição de componentes da madeira com o aumento da temperatura.

A maioria dos compostos condensáveis formados na torrefação, teoricamente, pode ser utilizada na indústria química, como precursores para outros produtos ou como solventes. No entanto, os compostos precisam ser separados e purificados antes de serem utilizados. O ácido acético é aplicado na produção de acetato de vinil monômero (VAM), que é usado na produção de tintas, adesivos, revestimentos de papel e acabamentos têxteis. O Furfural e seus derivados podem ser usados na produção de compostos aromatizantes, resinas de furano, revestimentos de superfície, produtos farmacêuticos, argamassa, polímeros e adesivos. O metanol é muito utilizado como um precursor para a produção de produtos químicos (TUMURULU et al., 2012).



#### 4 Conclusão

Os testes de torrefação da madeira utilizando um reator em escala piloto mostraram o potencial desta tecnologia para produção de um combustível renovável com alta densidade energética. O aumento da temperatura de torrefação causou um aumento da concentração de carbono e do poder calorífico do material sólido. Da mesma maneira, as razões atômicas H:C e O:C diminuíram com o aumento da temperatura, devido as reações de desidratação e descarboxilação.

O aumento da temperatura de torrefação (220, 250 a 280 °C) levou ao aumento das concentrações dos gases condensáveis e não condensáveis, devido à degradação dos componentes da madeira, hemicelulose, celulose e lignina. A concentração de CO<sub>2</sub> aumenta durante o aquecimento da madeira, e depois decresce com a estabilidade da temperatura. Isto indica que a degradação da hemicelulose e parte da celulose ocorrem no momento em que CO<sub>2</sub> é detectado.

Em suma, a perda de umidade e gases condensáveis e não condensáveis, que são compostos de baixo poder calorífico, tornaram a madeira torrada um sólido mais energético. O sólido torrado pode ser aplicado em processos de co-combustão com carvão ou outros resíduos, e os compostos condensáveis analisados podem ser utilizados como matéria prima para diversos setores industriais.

#### Referências

ASTM E711: 2004- Standart Test Method for Gross Calorific Value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter.

ASTM E777 (Standard Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel).

ASTM E778 (Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel).

CEN/TS 14774-1:2004. European Committee for Standardization. Solid biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method (English Version). August, 2004.

CEN/TS 14775: 2004. European Committee for Standardization. Solid biofuels - Method for the determination of ash content (English Version). August, 2004.

CEN/TS 15148: 2005. European Committee for Standardization. Solid biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter (English Version). December, 2005.

CEN/TS 15439 – Biomass Gasification - Tar and Particles in Product Gases – Sampling and Analysis, 2006.

HILL, S.J.; GRIGSBY, W.,J.; HALL, P.W., Chemical and cellulose crystallite changes in *Pinus radiata* during torrefaction. **Biomassa and Bioenergy**, n. 56, p. 92-98, 2013.

THÀNH, K.; COMMANDRÉ, J-M.; VALETTE, J.; VOLLE, G.; MEYER. M., Detailed identification and quantification of the condensable species released during torrefaction of lignocellulosic biomasses. **Fuel Processing Technology** 139, p. 226–235, 2015.



NANOU, P.; CARBO, C.C.; KIEL, J.A.H., Detailed mapping of the mass and energy balance of a continuous biomass torrefaction plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 89, p. 67-77, 2016.

PHANPHANICH, M.; MANI, S., Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102, p. 1246–1253, 2011.

PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G., Torrefaction of wood Part 2. Analysis of products. **Journal Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, p. 35-40, 2006.

ROUSSET, P.; AGUIAR, C.; LABBÉ, N.; COMMANDRÉ, J-M., Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction, **Bioresource Technology** 102, p.8225–8231, 2011.

TUMULURU, J.S.; SOKHANSANJ, S.; WRIGHT, C.T.; KREMER, T., **GC Analysis of Volatiles and Other Products from Biomass Torrefaction Process, Advanced Gas Chromatography - Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications**, Dr. Mustafa Ali Mohd (Ed.), ISBN: 978-953-51- 0298-4, InTech, 2012.

VALIX, M.; KATYAL, S; CHEUNG, W.H., Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse. **Bioresource Technology**, 223, p. 202–209, 2017.

VIRMOND, E.; ROCHA, J.D.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J., Valorization of agroindustrial solid residues and residues from biofuel production chains by thermochemical conversion: a review, citing brazil as a case study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.30, p. 197-229, 2013.