

Recebido: 21-06-2017 Aceito: 26-05-2018 Publicado: 11-10-2018

Avaliação da torrefação da madeira em curtos tempos de residência em um reator tipo rosca sem fim

Mateus Alves de Magalhães*, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Carlos Miguel Simões da Silva, Benedito Rocha Vital, Márcio Aredes Martins, Welliton Lelis Cândido

Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

RESUMO A torrefação da madeira permite melhorar algumas características consideradas indesejáveis para o uso energético, como baixo poder calorífico e alta umidade de equilíbrio. Para obtenção de um produto de qualidade e aumento produtividade do processo, são necessários estudos de melhorias na eficiência dos sistemas de torrefação. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um reator tipo rosca sem fim para torrefação de partículas de madeira de pinus em curtos tempos de residência. A madeira foi submetida à torrefação nas temperaturas de 210, 250 e 290 °C e nos tempos de residência de 3, 6 e 9 minutos. O desempenho do reator foi avaliado pelo rendimento em massa e em energia e perfil térmico da parte de torrefação. A qualificação energética da madeira foi feita por meio da umidade de equilíbrio higroscópico, densidade a granel, poder calorífico superior e útil, e densidade energética. O reator apresentou viabilidade técnica para torrefação de partículas de madeira em curtos tempos de residência. A torrefação promoveu significativa perda de massa, obtenção de madeira torrificada com alto rendimento energético e com melhores propriedades, principalmente, com maior densidade energética.

Palavras-chave: Tratamento térmico; madeira torrificada; densidade energética.

Evaluation of wood torrefaction in short residence times in a screw type reactor

ABSTRACT The wood torrefaction allows improvement characteristics considered undesirable for energetic use, as low calorific value and high equilibrium moisture. For obtaining a quality product and increase process productivity, it is necessary to study improvements in efficiency of torrefaction systems. The objective of this work was to evaluate the performance of a screw type reactor for torrefaction of pine wood particles in short residence times. The wood was submitted to torrefaction at temperatures of 210, 250 and 290 °C and at residence times of 3, 6 and 9 minutes. The performance of reactor was evaluated by mass and energy yields and thermal profile of torrefaction section. The energy qualification of wood was made by hygroscopic equilibrium moisture, bulk density, higher and net calorific value and energy density. The reactor presented technical feasibility for torrefaction wood particles in short residence times. The torrefaction promoted a significant mass loss, obtaining wood with high energy efficiency and better properties, mainly with higher energy density.

Keywords: Heat treatment; torrefied wood; energy density.

Introdução

A torrefação pode ser definida como uma pirólise parcial da biomassa em ambiente com restrição de oxigênio. O processo ocorre entre 200 e 300 °C, sob pressão atmosférica e por curtos tempos de residência, se comparado à pirólise para produção de carvão. Na torrefação da biomassa, obtém-se material torrificado de cor marrom escura, gases

condensáveis ricos em ácidos orgânicos e gases não condensáveis compostos principalmente por CO e CO₂ (BERGMAN et al., 2005; NHUCHHEN et al., 2014).

Diferentemente da pirólise convencional, na torrefação, o rendimento em massa é superior, sendo o principal objetivo reduzir os componentes de baixo poder calorífico que estão presentes na biomassa e, assim, preservar grande parte da

*Corresponding author: mateusmagalhaes91@gmail.com

energia. De modo geral, para uma redução em massa da ordem de 20%, ocorre um decréscimo de 10% no conteúdo energético da biomassa (KOPPEJAN et al., 2012).

A biomassa sofre várias mudanças durante a torrefação, tais como: redução da higroscopicidade, pela degradação das hemiceluloses e, conseqüentemente, dos grupos hidroxílicos responsáveis por tal propriedade (LI et al., 2012); aumento do poder calorífico superior, em função da degradação de compostos menos energéticos; aumento relativo do teor de lignina, em função da degradação da celulose, hemiceluloses e extrativos (NHUCHHEN et al., 2014) e, aumento da densidade energética, pelo aumento do poder calorífico útil (PENG et al., 2013).

A biomassa torrificada apresenta propriedades competitivas frente aos combustíveis fósseis e pode ser empregada em processos de conversão térmica, como a gaseificação e cogeração, ou mesmo na conversão, em briquetes e *pellets* (VAN DER STELT et al., 2011).

A torrefação pode ser dividida em quatro etapas básicas. A primeira compreende a secagem, sendo retirada apenas a água livre presente na biomassa; na segunda, é removida a água de constituição presente nas ligações e também alguns hidrocarbonetos; na terceira, ocorre a torrefação propriamente dita com a liberação de parte dos compostos voláteis; e, na quarta, ocorre o resfriamento à temperatura ambiente do material torrificado (NHUCHHEN et al., 2014).

Logo, os sistemas para torrefação da biomassa devem contemplar essas quatro etapas, sendo desejável que os mesmos sejam compactos, de baixo custo e consumo de energia, produtivos e que gerem materiais torrificadas homogêneos.

A torrefação pode ser realizada em diversos tipos de reatores, sendo os principais modelos disponíveis no mercado os tipos: tambor rotativo, rosca sem fim, múltiplos fornos, leito fluidizado, micro-ondas e correia transportadora

oscilante (KLEINSCHMIDT, 2011). Independente do sistema, o processo é influenciado, principalmente, pela temperatura de torrefação, tempo de residência no reator, granulometria e umidade da biomassa (NHUCHHEN et al., 2014).

O aumento da eficiência e produtividade dos reatores é necessário para viabilizar e tornar a biomassa torrificada ainda mais competitiva aos combustíveis fósseis. Muito se fala que os reatores do tipo rosca sem fim necessitam de maiores dimensões para serem equivalentes aos demais tipos, ou que apresentam limitação de aumento de escala de produção (NHUCHHEN et al., 2014). No entanto, a melhoria da eficiência na troca de calor de um reator tipo rosca sem fim permite a utilização de menores tempos de residência, conseqüentemente aumentando a produtividade e assegurando a qualidade do material torrificado.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho de um reator tipo rosca sem fim na torrefação de partículas de madeira de pinus em curtos tempos de residência, bem como o efeito do tratamento térmico sobre as propriedades energéticas da madeira.

Material e Métodos

Seleção e preparo do material

Foi utilizada, como matéria-prima, a madeira de *Pinus* sp. com idade aproximada de 20 anos, obtida a partir de um plantio florestal pertencente ao Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa.

A madeira foi previamente descascada e transformada em partículas utilizando um moinho martelo. As partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas, recolhendo-se a fração que passou pela peneira de 3 mm e ficou retida na de 0,5 mm.

Reator de torrefação

Para a torrefação da madeira, inicialmente, as partículas foram secas em estufa a 103 ± 2 °C até 0% de umidade para eliminar a influência da água sobre os tratamentos. Foram utilizados aproximadamente 5 kg de partículas secas para cada tratamento térmico.

Foram utilizadas três temperaturas (210, 250 e 290 °C) e três tempos de residência (3, 6 e 9 minutos) no processo de torrefação, definidos de acordo com testes preliminares.

As partículas foram torrificadas em um reator do tipo rosca sem fim, desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira na Universidade Federal de Viçosa, MG. O reator é composto por quatro sistemas básicos, sendo eles o de transporte de biomassa, aquecimento, resfriamento e exaustão dos gases, que são melhor descritos a seguir, Figura 1.

O sistema de transporte consiste de uma rosca sem fim com 2,25 m de comprimento e 13,7 cm de diâmetro, acionada por um motoredutor, que conduz a biomassa por meio de uma tubulação metálica do silo de alimentação, passando

pelos estágios de aquecimento e resfriamento até a saída do reator.

O sistema de aquecimento é composto por um queimador pirolítico de biomassa, que fornece gás quente para uma “camisa” que reveste a seção de torrefação, que possui comprimento de 1,375 m. A torrefação ocorre de forma indireta, por meio da troca de calor entre o gás de aquecimento e a tubulação metálica (que apresenta uma série de aletas responsáveis por aumentar a área de troca), e desta com a biomassa.

O sistema de resfriamento possui 0,5 m de comprimento, localizado ao final da etapa de aquecimento é baseado no arrefecimento da tubulação, por meio de troca indireta de calor com a água em circulação constante. Para tanto, utilizou-se uma minibomba submersa que faz a água circular de um reservatório para a “camisa” que reveste a seção de resfriamento, e desta para o reservatório, permitindo o reaproveitamento da água por meio de um circuito fechado.

O sistema de exaustão dos gases é composto de duas etapas, sendo a primeira referente à retirada do gás de aque-

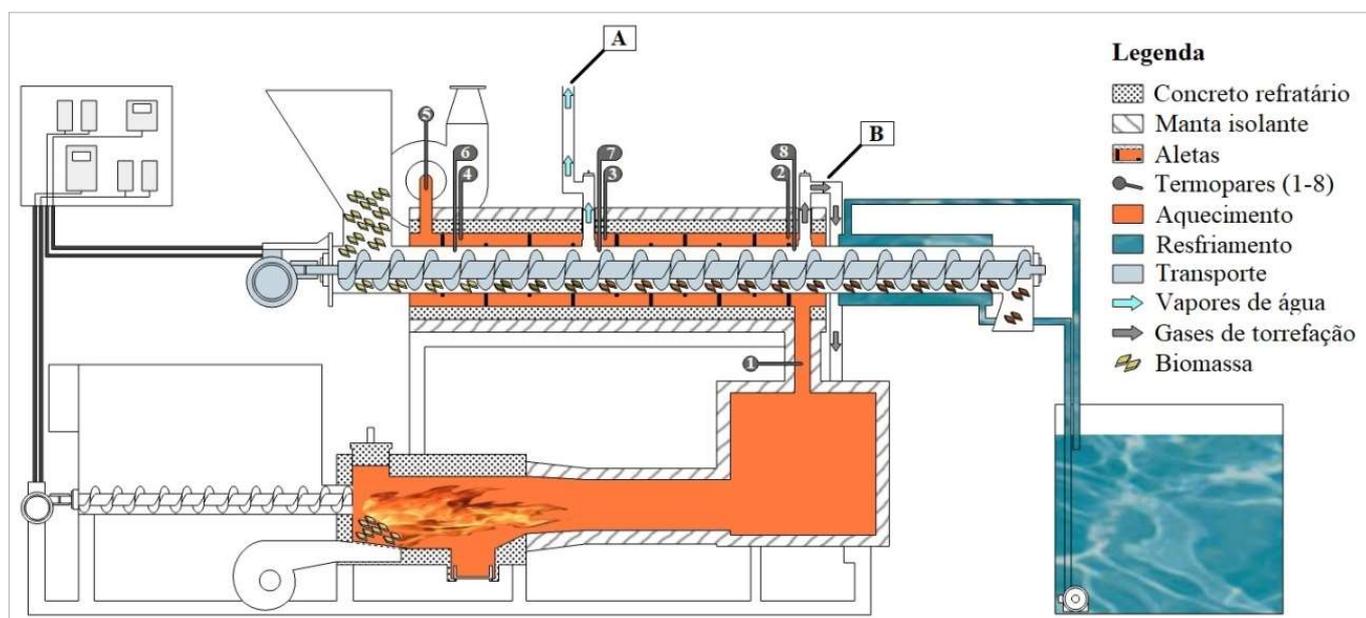


Figura 1 - Esquema do sistema de torrefação de biomassa. Patente requerida - BR 10 2016 010484 0.

Figure 1 - Scheme of the biomass torrefaction system. Required Patent - BR 10 2016 010484 0.

cimento advindo do queimador pirolítico, retirado com auxílio de um exaustor elétrico, localizado na extremidade oposta à entrada desse gás. E a segunda, referente à retirada dos vapores d'água (A) e materiais voláteis (B) produzidos durante o tratamento térmico, sendo a exaustão realizada por efeito "chaminé", por meio de duas saídas situadas ao longo da secção de torrefação.

Para realizar o controle do tempo de residência do material no reator, utilizou-se dois temporizadores analógicos que controlaram o motorreductor. Um dos temporizadores atua acionando o motorreductor por aproximadamente 4 segundos (tempo necessário para uma volta completa da rosca sem fim), e o outro atua desligando o motorreductor por um tempo pré-determinado. A soma desses dois tempos multiplicada pelo número de voltas da rosca sem fim na secção de torrefação definiu o tempo de residência para o tratamento térmico da madeira.

A temperatura da secção de torrefação foi monitorada por meio de um termômetro digital de marca *Gulton* e modelo *Gulterm 700-10S*, utilizando oito termopares tipo J.

Desempenho do reator de torrefação

O rendimento em massa de cada tratamento foi obtido dividindo-se a massa final de partículas de madeira torrificada pela massa inicial de partículas de madeira *in natura*, multiplicado por 100, conforme a equação abaixo.

$$RM = \frac{MFmt}{MIm} \times 100$$

sendo, RM: rendimento em massa, em %; MFmt: massa final de partículas de madeira torrificada, em kg; MIm: massa inicial de partículas de madeira *in natura*, em kg.

O rendimento em energia de cada tratamento foi obtido dividindo-se o poder calorífico superior (PCS) das partículas de madeira torrificada pelo valor médio do PCS das partículas

de madeira *in natura*, multiplicado pelo rendimento em massa, conforme a equação abaixo:

$$RE = \frac{PCSmt}{PCSm} \times RM$$

sendo, RE: rendimento em energia, em %; PCSmt: poder calorífico superior das partículas de madeira torrificada, em kcal/kg; PCSm: poder calorífico superior das partículas de madeira *in natura*, em kcal/kg; RM: rendimento em massa, em %.

Os mapas térmicos do reator de torrefação foram gerados por meio da interpolação das temperaturas entre os termopares no sentido longitudinal, foi considerado que a temperatura da região inferior era igual a da superior em um mesmo ponto. Para o gás de aquecimento foram obtidos pela interpolação das temperaturas coletadas nos termopares 1, 2, 3, 4 e 5, e para as partículas de madeira, pela interpolação das temperaturas coletadas nos termopares 6, 7 e 8, Figura 1.

Caracterização das partículas de madeira

Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico da madeira, amostras foram colocadas em uma câmara climática a 20 °C e 65% de umidade relativa até atingirem massa constante. A determinação do teor de umidade, em base seca, foi feita de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

A densidade a granel da madeira foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010), em amostras condicionadas a 65% de umidade relativa e 20 °C de temperatura.

O poder calorífico superior foi obtido utilizando uma bomba calorimétrica adiabática *IKA300*. A estimativa do poder calorífico útil foi realizada utilizando a equação abaixo, conforme o Anexo E da norma EN 14918 (DIN, 2010).

$$PCU_{\text{(pressão constante)}} = (PCS - 212,2 * H - 0,8*(O + N)) * (1 - 0,01 * M) - (24,43 * M)$$

sendo: PCU_(pressão constante): poder calorífico útil em pressão constante, em J.g⁻¹; PCS: poder calorífico superior, em J.g⁻¹; H, O, N: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, respectivamente, em porcentagem (%); M: umidade, base úmida, em porcentagem (%);

Constantes: A energia de vaporização (pressão constante) para a água a 25 °C é de 44,01 kJ.mol⁻¹. Isto corresponde a 218,3 J.g⁻¹ para 1% de hidrogênio (m/m) ou 24,43 J.g⁻¹ para 1% de umidade (m/m) na amostra.

A densidade energética foi obtida por meio do produto do poder calorífico útil pela densidade a granel.

Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos (três temperaturas e três tempos) e três repetições, totalizando 27 unidades amostrais, mais três unidades amostrais referentes ao controle (biomassa não torrificada).

As médias das propriedades da madeira dentro de cada tratamento foram submetidas aos testes de *Lilliefors*, para testar a normalidade, e *Cochran*, para testar a homogeneidade das variâncias. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste *Tukey* para os tratamentos a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

Perfil térmico do reator

Analisando a Figura 2, observa-se, nos mapas térmicos, uma distribuição gradual da temperatura no reator, evidenciando zonas de secagem, torrefação e fonte de calor para o sistema.

Nos tratamentos realizados a 250 e 290 °C, as partículas foram submetidas a temperaturas iniciais superiores a 120 e 132 °C, respectivamente, conforme mostrado nas Figuras 2D a 2F e 2G a 2I, respectivamente. Para as partículas torrificadas a 210 °C, a máxima temperatura inicial registrada foi de 97 °C, Figura 2C. De modo geral, com o aumento da temperatura do tratamento, observou-se uma maior temperatura inicial, o que promoveu o aumento da taxa de aquecimento da biomassa, antecipando a degradação térmica e, conseqüentemente, a perda de massa.

De acordo com as temperaturas observadas na primeira metade da região de torrefação, é possível que ocorra principalmente a secagem da biomassa, podendo iniciar uma pré-torrefação para os maiores tempos de residência.

As biomassas torrificadas a 250 e 290 °C alcançam temperaturas superiores a 200 °C na região central. Segundo Basu (2013), a partir deste ponto, inicia-se a degradação térmica mais pronunciada, pois, até atingir essa temperatura, a madeira, de modo geral, apresenta-se estável termicamente, tendo perdas de massas eventuais pela presença de extrativos voláteis. Verifica-se que a temperatura máxima na região central para as biomassas torrificadas a 210 °C foi em torno de 160 °C, ocorrendo basicamente a secagem da mesma. Neste sentido, os tratamentos realizados a 210 °C seriam mais indicados para a secagem da biomassa por apresentarem menor gasto energético, devendo apenas estabelecer um tempo ótimo para cada biomassa e teor de umidade inicial.

O tempo de residência da biomassa no reator tem grande influência sobre a operação e produtividade do equipamento e também na qualidade do produto final. Características de cada tipo de biomassa como granulometria, densidade e umidade têm efeito direto no tempo de residência a ser utilizado na torrefação, que está intimamente associado à taxa

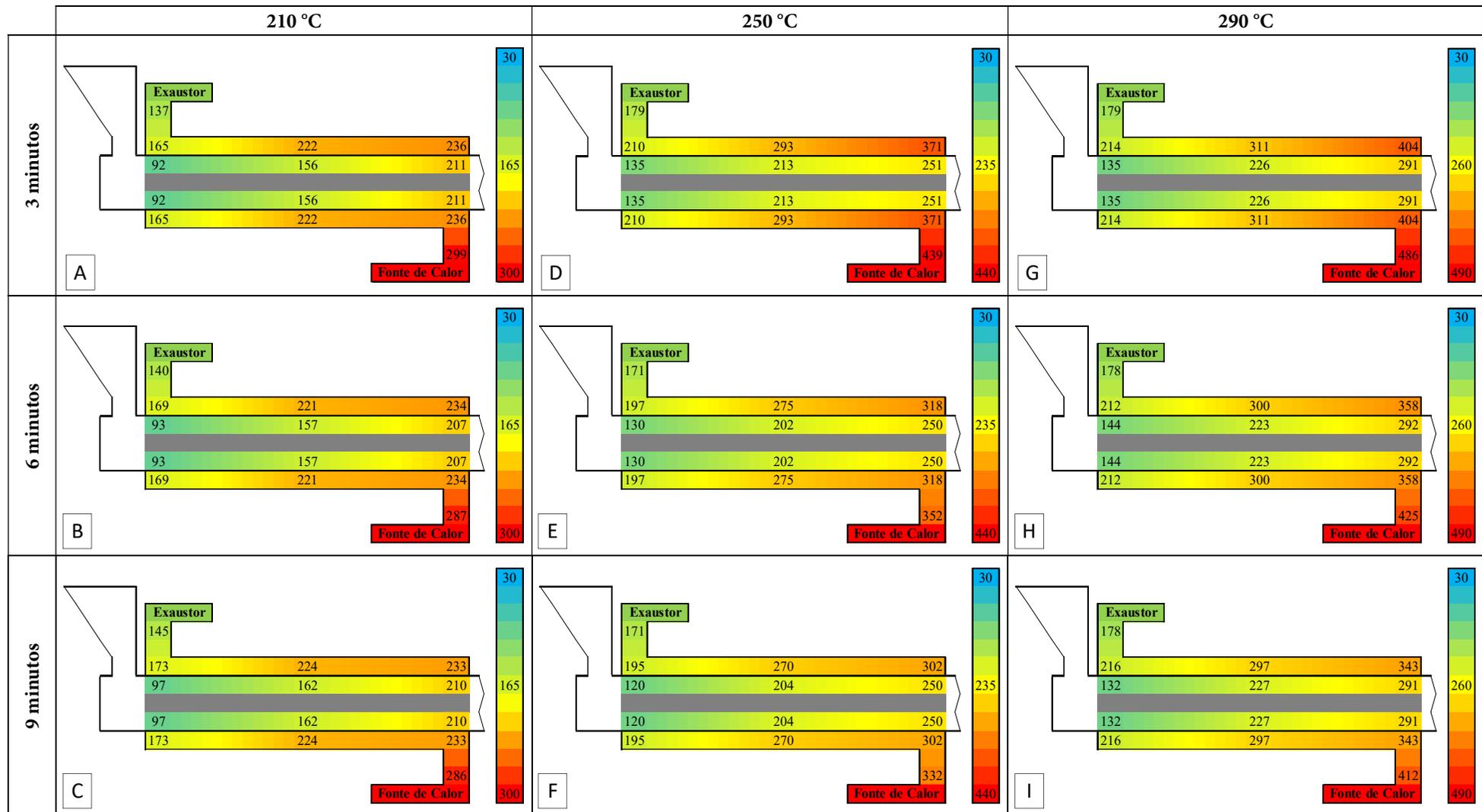


Figura 2 - Mapas térmicos do processo de torrefação das partículas em reator tipo rosca sem fim em função dos tratamentos.

Figure 2 - Thermal maps of the torrefaction process of the particles in a screw type reactor according to the treatment.

de transferência de calor (NHUCHHEN et al., 2014). Assim, o tipo de biomassa e o tempo de residência são variáveis inter-relacionadas e dependentes no processo de torrefação.

No menor tempo de residência foi observado um maior fluxo de calor junto à passagem da biomassa. Dessa forma, observou-se uma maior demanda de temperatura no gás de aquecimento e menor eficiência de troca de calor entre o equipamento de torrefação e a biomassa, principalmente, para as temperaturas de 250 e 290 °C.

Ademais, como observado na Figura 2, maiores tempos de torrefação demandam menores temperaturas dos gases de aquecimento, o que contribui para preservação das partes metálicas do equipamento e reduz o gasto de combustível para fornecimento de calor para o sistema.

Ainda na Figura 2, observa-se que as temperaturas do gás de aquecimento, na saída do reator, foram em média 141, 173 e 178 °C para as partículas torrificadas a 210, 250 e 290 °C, respectivamente. Verificou-se uma grande perda térmica, devido ao déficit de troca de calor pelo equipamento de torrefação, sugerindo o redimensionamento para o melhor aproveitamento do calor. Essas temperaturas de saída dos gases sugerem também que o redimensionamento seja feito em função da temperatura de torrefação, pois o equipamento apresenta diferentes comportamentos nas diferentes temperaturas avaliadas.

Rendimentos

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios de rendimento e perda de massa em função dos tratamentos térmicos.

O rendimento em massa decresceu com o aumento da temperatura ou tempo de torrefação, o que era esperado, uma vez que o tratamento térmico promove a perda de massa, sendo observada, sobretudo, nos tratamentos mais intensos, devido a degradação, principalmente, das hemiceluloses. A

massa resultante da torrefação da madeira é composta, na maioria, dependendo da intensidade do tratamento térmico, por celulose e lignina, sendo esta última uma macromolécula condensada que apresenta estrutura rica em carbono e o principal responsável pelo rendimento da torrefação devido a sua maior resistência a degradação térmica (NHUCHHEN et al., 2014).

Tabela 1 - Rendimentos em massa e energia para as partículas torrificadas

Table 1 - Mass and energy yields for torrefied particles

Tratamento	Rendimento em	Rendimento em
	Massa	Energia
	%	%
1 (210-3)	99,6	99,8
2 (210-6)	99,7	100,0
3 (210-9)	99,8	100,0
4 (250-3)	98,2	99,3
5 (250-6)	98,0	100,0
6 (250-9)	96,8	99,1
7 (290-3)	97,8	100,0
8 (290-6)	95,3	100,0
9 (290-9)	93,0	98,3

Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente.

Na maioria dos tratamentos, não foi observada redução no rendimento em energia, mesmo ocorrendo perdas de massa, podendo ser justificado pelo aumento do poder calorífico superior das partículas torrificadas. Para tratamentos mais intensos houve uma pequena redução do rendimento em energia, porém essa redução é inferior ao decréscimo do rendimento em massa.

Caracterização da madeira

A umidade de equilíbrio higroscópico das partículas de madeira reduziu com a intensificação do tratamento térmico, principalmente para os tratamentos 6, 8 e 9. Ao se comparar as partículas *in natura* com as torrificadas a 290 °C por 9 minutos, a umidade reduziu em 12,72%, ocasionada pela

eliminação de parte dos compostos químicos presentes na madeira, que são mais hidrofílicos, como as hemiceluloses. Esses componentes apresentam grande número de grupos (-OH) livres, que, na madeira *in natura*, são responsáveis pela adsorção de água, com consequente aumento do teor de umidade. Por outro lado, principalmente, a lignina que se apresenta com um componente hidrofóbico é preservada durante a torrefação (PHANPHANICH; MANI, 2011).

Uma menor umidade de equilíbrio é desejável, por aumentar o poder calorífico útil da biomassa, uma vez que a água contida no material contribui de forma negativa no momento da combustão. Outro fato interessante é a redução da possibilidade de ataque de microrganismos decompositores da madeira quando armazenada por longos períodos de tempo (TUMULURU et al., 2011).

A densidade a granel aumentou com o incremento da temperatura ou tempo de torrefação, tendo o tratamento mais severo (290 °C e 9 minutos) um acréscimo de 9,81% em comparação ao controle. Esse aumento se deve à redução do tamanho das partículas durante o tratamento térmico, considerando que a perda de massa foi inferior à contração volumétrica (PHANPHANICH; MANI, 2011).

A maior densidade a granel contribui de forma positiva para o aumento da densidade energética, nas atividades de movimentação e no armazenamento da biomassa, reduzindo custos e possibilitando o aumento da distância ótima de transporte.

Observou-se um aumento do poder calorífico superior com o incremento da temperatura ou tempo de torrefação. Em comparação ao controle, o tratamento a 290 °C e 9 minutos apresentou um acréscimo no poder calorífico superior de 5,71%. O aumento proporcional da lignina em detrimento à eliminação das hemiceluloses é o principal fator

a influenciar o acréscimo do poder calorífico (NHUCHHEN et al., 2014).

O poder calorífico superior é uma das principais propriedades na seleção da biomassa para o uso energético, auxiliando também no dimensionamento dos equipamentos de empreendimentos, desde a parte de campo até as instalações industriais. A madeira destinada ao uso energético deve conter o maior poder calorífico possível para que na combustão possa liberar maior quantidade de energia. A torrefação vem incrementar o poder calorífico de forma significativa, mostrando-se como uma alternativa viável para melhorias energéticas na biomassa (NHUCHHEN et al., 2014).

O acréscimo no poder calorífico útil foi significativo em relação ao controle, chegando a 7,88% para o tratamento a 290 °C e 9 minutos, sendo mais pronunciado nos tratamentos realizados nas temperaturas de 250 e 290 °C e nos maiores tempos de residência. Esse aumento se deve, principalmente, em função do incremento no poder calorífico superior e pela redução da umidade de equilíbrio higroscópico.

A densidade energética obteve um aumento significativo com o incremento da temperatura ou tempo de torrefação, chegando a 18,37% para o tratamento a 290 °C e 9 minutos em comparação ao controle. O aumento da densidade energética é função do acréscimo na densidade a granel e poder calorífico superior, bem como pela redução da umidade de equilíbrio higroscópico.

A densidade energética pode ser definida como a quantidade de energia útil liberada por um combustível por unidade de volume, quando submetido à combustão. Sendo assim, permite avaliar o potencial de determinada biomassa para geração de energia, pois contribui positivamente para a otimização do transporte, reduzindo custos e aumentando o raio de abrangência. Ademais, viabiliza o armazenamento de

Tabela 2 - Características da madeira de pinus *in natura* e torrificada
Table 2 - Characteristics of *in natura* and torrefied pinus wood

Tratamento	UEH _{bs}	DG	PCS	PCU	DE
	%	kg/m ³	MJ/kg	MJ/kg	GJ/m ³
Controle	12,0 a	148,5 g	20,0 c	16,5 c	2,45 f
1 (210-3)	11,7 ab	149,0 g	20,1 c	16,6 bc	2,47 f
2 (210-6)	11,5 ab	155,2 de	20,3 c	16,8 bc	2,61 de
3 (210-9)	11,9 ab	156,8 cd	20,4 c	16,8 bc	2,63 d
4 (250-3)	11,7 ab	153,6 ef	20,3 c	16,7 bc	2,57 e
5 (250-6)	11,2 ab	154,1 ef	20,5 bc	17,1 b	2,63 d
6 (250-9)	11,2 bc	158,5 bc	20,5 bc	17,0 b	2,70 c
7 (290-3)	11,6 ab	151,8 f	20,6 bc	17,0 b	2,58 e
8 (290-6)	10,3 d	161,1 ab	21,0 ab	17,7 a	2,85 b
9 (290-9)	10,4 cd	163,1 a	21,2 a	17,8 a	2,90 a

UEH_{bs} = umidade de equilíbrio higroscópico em base seca; DG = densidade a granel; PCS = poder calorífico superior; PCU = poder calorífico útil; DE = densidade energética. Valores entre parênteses indicam temperatura e tempo de torrefação, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% de significância pelo teste *Tukey*.

grandes quantidades de energia por longos períodos de tempo.

Conclusões

O reator mostrou viável tecnicamente para torrefação de partículas de madeira em curtos tempos de residência. Os resultados dos mapas térmicos mostraram que é possível aumentar a eficiência de troca de calor entre o reator e a biomassa, de modo a melhorar a qualidade do produto torreficado.

A torrefação em curtos tempos de residência, como avaliada no presente estudo, promoveu, significativa perda de massa, principalmente, no tratamento 290 °C e 9 minutos; a obtenção de madeira torreficada com alto rendimento energético; e devido ao incremento na densidade a granel e poder calorífico, e a redução da umidade de equilíbrio higroscópico, obteve uma biomassa como maior densidade energética, importante parâmetro a ser considerado quando a madeira se destina ao uso energético.

Agradecimentos

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo, ao CNPq, ao programa P&D coordenado pela ANEEL (Projeto: GT/D 557 CEMIG/FAPEMIG) e ao funcionário Eder Cabral de Sousa pelo auxílio na construção do reator de torrefação.

Referências

- BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. **Academic Press**, 2013.
- BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; KIEL, J. H. A.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass **ECN Biomass**, v. 05, n. 067, p. 50, 2005.
- DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 14774-2: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method**. Berlim: CEN: 9 p. 2009.
- _____. **EN 14918: Determination of calorific value**. Berlim: CEN: 63 p. 2010.
- _____. **EN 15103: Solid biofuels - Determination of bulk density**. Berlim: CEN: 14 p. 2010.
- KLEINSCHMIDT, C. P. **Overview of international developments in torrefaction**. Austria, p.9. 2011

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. **IEA Bioenergy Task 32 report: Status overview of torrefaction technologies**. Enschede, p.61. 2012

LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, X. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 453-458, 2012.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A. Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

PENG, J. H.; BI, X. T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C. J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1246-1253, 2011.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748-3762, 2011.