

## Modelagem e otimização da cinética do processo de pirólise de biomassas florestais

### *Modeling and optimization of the kinetics of the pyrolysis process of forest biomass*

*Dile Pontarolo Stremel<sup>1</sup>, Lincoln Audrew Cordeiro<sup>2</sup>*

**RESUMO:** A modelagem computacional e otimização no campo dos processos industriais, mais precisamente relacionados à pirólise de biomassa, podem auxiliar na determinação das melhores condições operacionais de processamento, além de contribuir com a demanda crescente de energia com sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi a implementação de técnicas de otimização para ajuste de parâmetros cinéticos e a aplicação de um modelo matemático fenomenológico visando descrever o comportamento dinâmico da pirólise para as biomassas Carvalho (*Quercus* sp.) e Tauari (*Couratari* sp.). Para essa finalidade, empregou-se o *software* livre Scilab, linguagem de programação de alto nível, orientada à análise numérica, computação científica e testes estatísticos paramétricos. Os resultados mostraram que o modelo foi confiável quando comparado com dados experimentais da literatura para o Carvalho e com os coletados através de experimentos realizados em laboratório para o Tauari. A aplicação da análise da variância (ANOVA) mostrou que o valor de F calculado variou de 2294,0248 a 41,6304 sendo maior que o F tabelado ao nível de significância de 5% (0,0043 e 4,1055), o que demonstra que o modelo é adequado para prever o comportamento da pirólise das biomassas nas condições operacionais simuladas.

**Palavras-chave:** Análise computacional. Scilab. Termoconversão.

**ABSTRACT:** Computational modeling and optimization in the field of industrial processes, specifically related to biomass pyrolysis, may be an asset in determining the best processing conditions. It may also contribute towards the growing demand for energy with environmental sustainability. Current study implements the optimization of techniques to adjust kinetic parameters and the application of a phenomenological mathematical model to describe the dynamic behavior of pyrolysis for oak (*Quercus* sp.) and tauari (*Couratari* sp.) biomasses. Scilab software, a high-level programming language, was employed for numerical analysis, scientific computing and parametric statistical tests. Results showed that the model was reliable when compared to experimental data from the literature for oak and data from laboratory experiments for Tauari. Variance analysis (ANOVA) showed that F value ranged from 2294.0248 to 41.6304, higher than F tabled at 5% significance level (0.0043 and 4.1055). This fact demonstrates that the model may predict the behavior of biomass pyrolysis under the simulated operating conditions.

**Keywords:** Computational analysis. Scilab. Thermoconversion.

---

**Autor correspondente:**  
Dile Pontarolo Stremel: dile@ufpr.br

Recebido em: 31/03/2021  
Aceito em: 26/11/2021

---

<sup>1</sup> Docente Permanente do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

<sup>2</sup> Mestre do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade é instigada a se aliar na demanda crescente de energia com sustentabilidade, sendo que recursos de origem fóssil e as emissões de gases de efeito estufa motivam o emprego de fontes de caráter sustentável, renovável e de baixo custo (SANTIAGO; RODRIGUES, 2017). Logo, o uso de biomassa florestal é um dos recursos a serem priorizados, sendo uma alternativa de fonte energética renovável, técnica, econômica e ambientalmente viável (LOPES; BRITO; MOURA, 2016). Porém, no Brasil, dos 46,1% da matriz energética oriunda de fontes renováveis, cerca de 8,7% correspondem à biomassa florestal (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Assim, dentro das tecnologias para produção de energia a partir da biomassa, existe a termoconversão, que compreende os processos de combustão, gaseificação, liquefação e pirólise (ÖZBAY; ÖZÇİFÇİ; KÖKTEN, 2016; MOTA *et al.*, 2015). A pirólise é um dos processos de conversão fundamental termoquímico com abstenção ou limitado suprimento de oxigênio (YEO *et al.*, 2019).

Na literatura pode-se verificar que existem diversas biomassas que são utilizadas para pirólise, por exemplo, bagaço de cana (BRANDÃO *et al.*, 2018; DAVID *et al.*, 2018; NORAINI *et al.*, 2016; LIN; CHEN, 2015), lodo de esgoto (TANG *et al.*, 2018; TANG; ZHENG; ZHANG, 2018; WEI *et al.*, 2015), casca e grãos de café (SETTER *et al.*, 2020; CONESA *et al.*, 2016), resíduos florestais (CHIRESHE; COLLARD; GÖRGENS, 2020; DIAS JUNIOR *et al.*, 2020; FÉLIX *et al.*, 2017), entre outros.

Atualmente existem três processos de pirólise no mundo, a pirólise lenta, a rápida e ultrarrápida ou instantânea (MOTA *et al.*, 2015). Na pirólise lenta a biomassa é pirolisada em baixas taxas de aquecimento, cujo objetivo principal é produzir carvão (FAHMY *et al.*, 2020; CARNEIRO *et al.*, 2013; GOYAL; SEAL; SAXENA, 2008). Já a pirólise rápida, consiste na obtenção principalmente de bio-óleo. Nesse caso, o processo ocorre em condições que favorecem elevados coeficientes de transferência de calor e taxas de aquecimento de biomassa a uma temperatura em torno de 500 °C seguido de um rápido resfriamento, separação e condensação de um líquido. O tempo curto de permanência dos produtos primários (2 a 3 s) no reator permite maximizar o rendimento de bio-óleo ao evitar a fragmentação térmica e catalítica subsequente dos vapores, que originam principalmente os produtos gasosos não condensáveis, e também impedir a recombinação dos produtos primários da pirólise, precursores do carvão (FAHMY *et al.*, 2020; MÜLLER *et al.*, 2013). Também tem-se o processo ultrarrápido ou instantâneo que é um processo que ocorre em poucos segundos em altíssimas taxas de aquecimento, favorecendo a produção de bio-óleo (FAHMY *et al.*, 2020).

A pirólise envolve inúmeras reações complexas, conseqüentemente acaba gerando um grande número de produtos intermediários e finais, sendo difícil conceber um modelo exato de reação, mas abre caminhos para pesquisadores proporem diferentes mecanismos (PRAKASH; KARUNANITHI, 2008). Geralmente, consideram-se três categorias principais, sendo representados por carvão, alcatrão (bio-óleo) e o combustível volátil/gás (CORREA; SANTOS, 2019; YEO *et al.*, 2019; MOTA *et al.*, 2015; MELO, 2012; THURNER; MANN, 1981; SHAFIZADEH; CHIN, 1977). A fração líquida (bio-óleo) é submetida a uma pirólise adicional convertendo em voláteis e carvão (MELO, 2012; THURNER; MANN, 1981; SHAFIZADEH; CHIN, 1977).

Os modelos cinéticos de pirólise envolvem mecanismos de reações primárias e secundárias, conforme Ciesielski *et al.* (2017) e Melo (2012). A primeira etapa cinética ocorre de maneira endotérmica, já na segunda etapa são reações exotérmicas, liberando energia (MELO, 2012, p. 67).

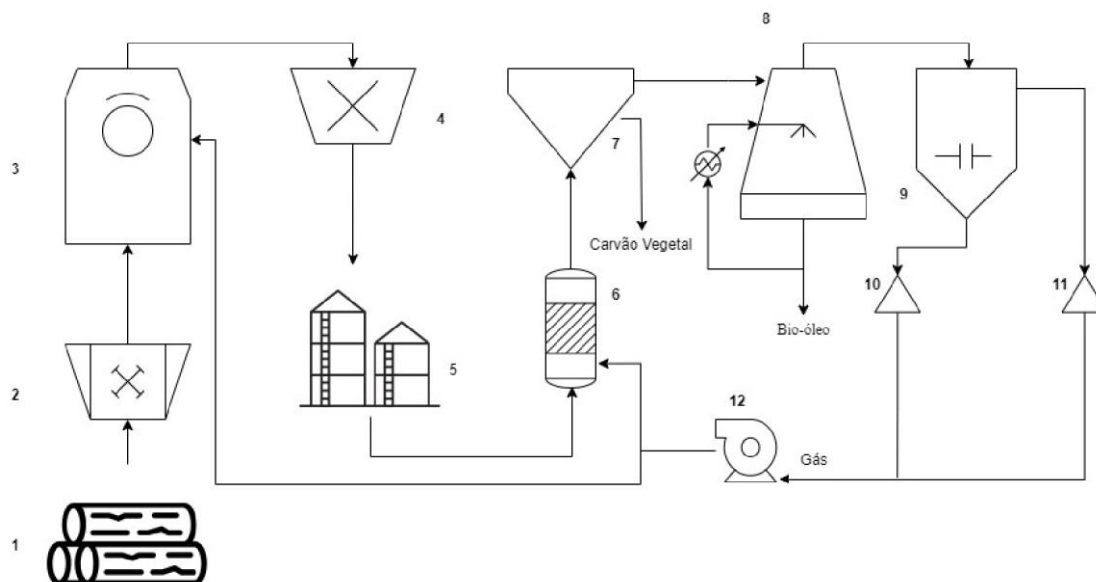
Resultados experimentais relacionados à formação de produtos para validação de modelos em condições operacionais muitas vezes não estão disponíveis na literatura. Gul *et al.* (2017) e Thurner e Mann (1981) apresentam experimentos de pirólise em amplas faixas de temperatura e tempo servindo ao propósito de investigação e obtenção de modelos alternativos mais completos e estimativa de novos valores para as constantes cinéticas. O ajuste de parâmetros cinéticos é um procedimento iterativo que envolve resolução numérica de equações diferenciais e avaliação da qualidade do modelo através da minimização de uma função cujo objetivo que representa as diferenças dos quadrados experimentais e calculados (MARTÍN-LARA *et al.*, 2017).

Com base no exposto, a proposta deste trabalho foi a implementação de técnicas de otimização para ajuste de parâmetros cinéticos e aplicação de um modelo matemático fenomenológico visando descrever o comportamento dinâmico da pirólise para as biomassas Carvalho (*Quercus sp.*) e Tauari (*Couratari sp.*).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para entendimento da metodologia adotada, baseou-se em um exemplo esquemático de pirólise da madeira (Figura 1). Müller *et al.* (2013) exemplificam o processo consistindo em: (1 e 2) redução de tamanho da biomassa, (3) secagem, (4) moagem, (5) armazenamento em um silo hermético e alimentação, (6) reator de pirólise, (7) ciclone para separação do resíduo carbonáceo (carvão) grosso, (8) resfriador de captura para a corrente gasosa quente com reaproveitamento do bio-óleo formado como fonte de resfriamento do gás e (9) precipitador eletrostático para separação de sólidos e gotas arrastadas. No final do processo, parte dos

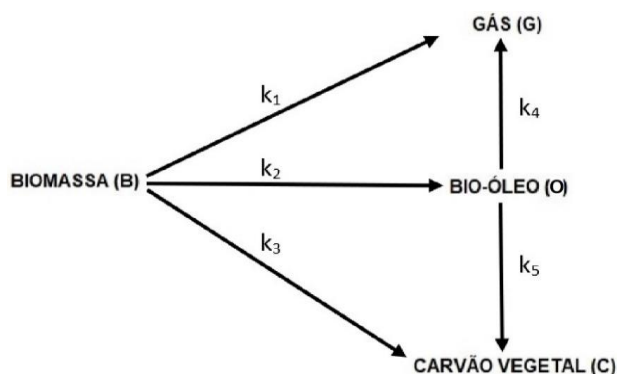
resíduos de carvão e o gás de pirólise passam pelos queimadores (10 e 11). O gás resultante então é encaminhado ao soprador (12) para gerar calor ao reator de pirólise e secagem da matéria-prima.



**Figura 1.** Esquema de uma instalação de pirólise rápida para biomassa florestal.

Fonte: Adaptado de Müller *et al.* (2013).

No esquema mostrado da Figura 1, a formação de carvão, bio-óleo e biogás ocorre no reator de pirólise. Nesse sistema, o mecanismo cinético considerado para fins de modelagem, otimização e simulação é o de duas etapas sucessivas (Figura 2).



**Figura 2.** Mecanismo cinético em duas etapas.

Fonte: Adaptado de Melo (2012, p. 68).

Na primeira etapa, a biomassa se decompõe através de três reações paralelas produzindo gases, bio-óleo e carvão residual. Na segunda ocorre a decomposição do bio-óleo em gases e carvão vegetal (MELO, 2012).

O modelo de pirólise a ser aplicado leva em conta a dinâmica da reação e cinética de Arrhenius (Equações 1 a 9). Os parâmetros  $A_i$  são os fatores pré exponenciais ou fator de frequência em  $s^{-1}$ ,  $E_{A_i}$  são as energias de ativação em  $kJ.kmol^{-1}$  e  $R$  é a Constante Universal dos Gases no valor de  $8,314 kJ.kmol^{-1} K^{-1}$ . Da teoria cinética dos gases, o fator  $e^{-E/RT}$  fornece a fração de colisões entre as moléculas que juntas possuem a energia de ativação  $E$ . Essa energia, tem sido interpretada como a energia mínima que as moléculas reagentes devem possuir antes que a reação possa ocorrer (FOGLER, 2002).

$$\frac{dB}{dt} = -(k_1 + k_2 + k_3)B \quad (1)$$

$$\frac{dG}{dt} = k_1B + k_4O \quad (2)$$

$$\frac{dO}{dt} = k_2B - (k_4 + k_5)O \quad (3)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_3B + k_5O \quad (4)$$

$$k_1 = A_1 e^{-\frac{E_{A1}}{RT}} \quad (5)$$

$$k_2 = A_2 e^{-\frac{E_{A2}}{RT}} \quad (6)$$

$$k_3 = A_3 e^{-\frac{E_{A3}}{RT}} \quad (7)$$

$$k_4 = A_4 e^{-\frac{E_{A4}}{RT}} \quad (8)$$

$$k_5 = A_5 e^{-\frac{E_{A5}}{RT}} \quad (9)$$

Onde,

$B \rightarrow$  fração mássica de biomassa (%)

$G \rightarrow$  fração mássica de gás (%)

$O \rightarrow$  fração mássica de bio-óleo (%)

$C \rightarrow$  fração mássica de carvão (%)

$k_i \rightarrow$  equações de Arrhenius

$t \rightarrow$  tempo (segundos)

$T \rightarrow$  temperatura (K)

Os valores iniciais para a estimativa dos parâmetros cinéticos foram obtidos na literatura conforme demonstrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros iniciais de Arrhenius registrados em literatura e empregados na otimização

Parâmetro	Unidade	Valor	Referência
A <sub>1</sub>	s <sup>-1</sup>	1,434 x 10 <sup>4</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
A <sub>2</sub>	s <sup>-1</sup>	4,125 x 10 <sup>6</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
A <sub>3</sub>	s <sup>-1</sup>	7,377 x 10 <sup>5</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
A <sub>4</sub>	s <sup>-1</sup>	7,900 x 10 <sup>3</sup>	Velden <i>et al.</i> (2008, p. 134)
A <sub>5</sub>	s <sup>-1</sup>	3,615 x 10 <sup>0</sup>	Melo (2012, p. 69)
E <sub>A1</sub>	kJ kmol <sup>-1</sup>	88,600 x 10 <sup>3</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
E <sub>A2</sub>	kJ kmol <sup>-1</sup>	112,700 x 10 <sup>3</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
E <sub>A3</sub>	kJ kmol <sup>-1</sup>	106,500 x 10 <sup>3</sup>	Thurner e Mann (1981, p. 486)
E <sub>A4</sub>	kJ kmol <sup>-1</sup>	81,000 x 10 <sup>3</sup>	Velden <i>et al.</i> (2008, p. 134)
E <sub>A5</sub>	kJ kmol <sup>-1</sup>	32,000 x 10 <sup>3</sup>	Melo (2012, p. 69)

Inicialmente considerou-se os dados experimentais da literatura que foram coletados por Thurner e Mann (1981), fazendo uso da serragem de Carvalho (*Quercus* sp.). Desse modo, utilizando otimização computacional, foi possível obter parâmetros ajustados e um modelo capaz de prever os dados experimentais de pirólise de biomassas florestais com precisão.

Para o ajuste dos parâmetros A<sub>i</sub> e k<sub>i</sub>, empregou-se a técnica de otimização dinâmica não linear, cujo procedimento consiste na minimização da soma do quadrado dos resíduos através do algoritmo de Levenberg-Marquardt empregando a sub-rotina *lsqrsolve* disponível no *software* Scilab (BAUDIN; COUVERT; STEER, 2010).

Posteriormente, fez-se a simulação e comparação com outros ensaios de termoconversão de mesma natureza, nas condições de temperaturas a 354 °C e 392 °C da literatura de Thurner e Mann (1981). Foi possível também simular o comportamento dinâmico de uma Análise Termogravimétrica (TGA), para madeira de Tauari (*Couratari* sp.). O TGA tem sido considerada uma poderosa técnica na caracterização de comportamentos de conversão térmica e modelagem cinética para a pirólise de biomassa (HU *et al.*, 2015). A escolha do Tauari deveu-se ao fácil acesso para aquisição do material. Com os resultados da simulação, avaliou-se o desempenho do modelo aplicando-se técnicas estatísticas paramétricas (ANOVA) considerando os Testes F e coeficientes de determinação R<sup>2</sup>, tanto para os dados da literatura quanto para os coletados em laboratório (TGA).

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

#### 3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PARA TEMPERATURA FIXA E TEMPO VARIÁVEL

Na Tabela 2 tem-se os parâmetros (fator de frequência e energia de ativação) encontrados, fazendo uso da técnica de otimização, os quais praticamente apresentaram valores próximos aos da literatura. Para obter o ajuste dos parâmetros, poucos resultados experimentais

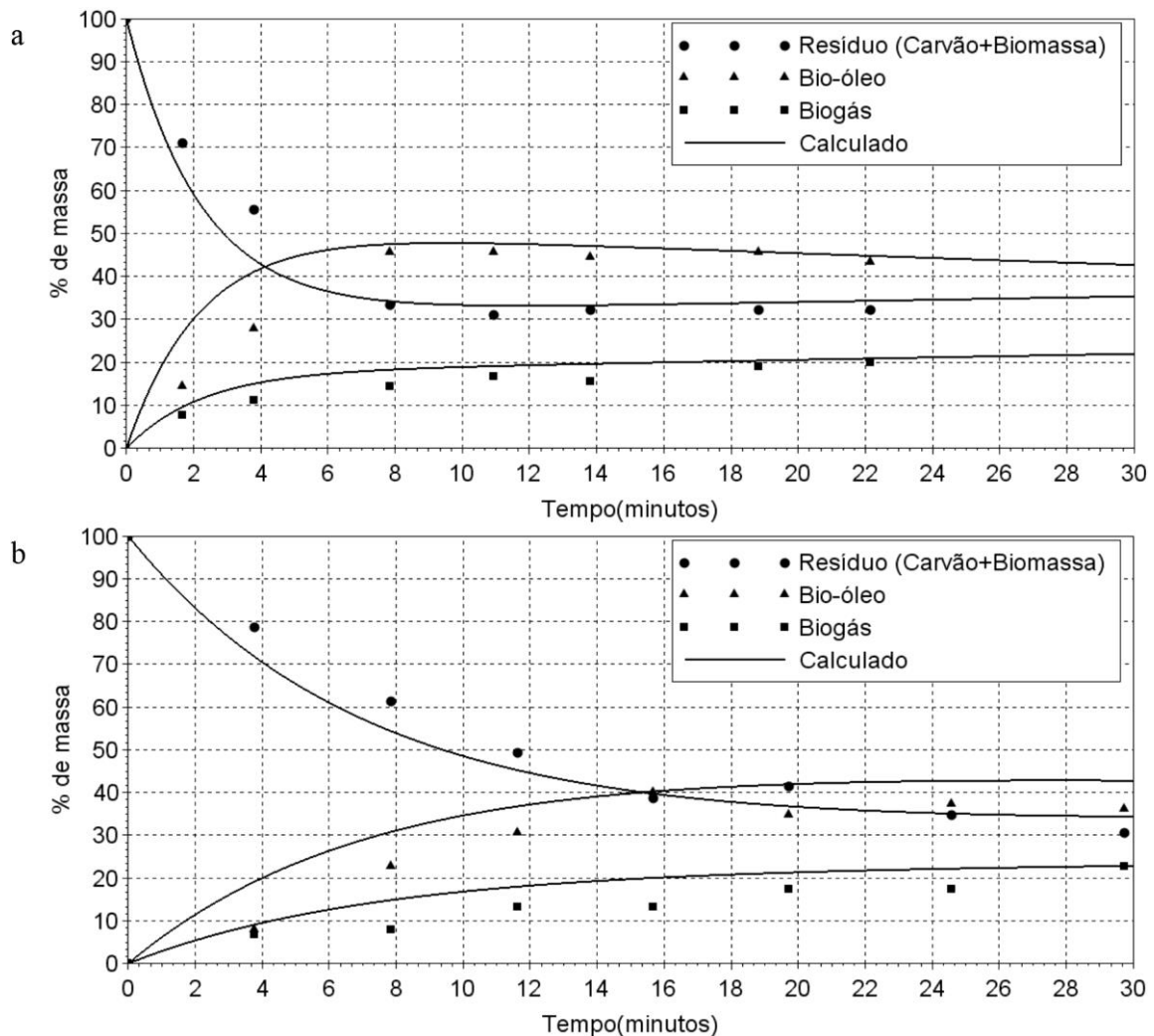
encontraram-se disponíveis na literatura. Utilizou-se os dados experimentais de Thurner e Mann (1981) para verificar qual o melhor conjunto de parâmetros cinéticos otimizados. Essa referência foi utilizada por possuir maior amplitude de informações dos valores experimentais em diferentes faixas de temperaturas e tempo.

**Tabela 2.** Resultados dos parâmetros cinéticos otimizados comparados aos iniciais obtidos pela literatura

Parâmetro	Valor Inicial	Literatura	Valor Otimizado	Unidade
A <sub>1</sub>	1,434 x 10 <sup>4</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	1,161 x 10 <sup>4</sup>	s <sup>-1</sup>
A <sub>2</sub>	4,125 x 10 <sup>6</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	3,753 x 10 <sup>6</sup>	s <sup>-1</sup>
A <sub>3</sub>	7,377 x 10 <sup>5</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	5,989 x 10 <sup>5</sup>	s <sup>-1</sup>
A <sub>4</sub>	7,900 x 10 <sup>3</sup>	Velden <i>et al.</i> (2008, p. 134)	0,396 x 10 <sup>3</sup>	s <sup>-1</sup>
A <sub>5</sub>	3,615 x 10 <sup>0</sup>	Melo (2012, p. 69)	1,249 x 10 <sup>0</sup>	s <sup>-1</sup>
E <sub>A1</sub>	88,600 x 10 <sup>3</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	88,276 x 10 <sup>3</sup>	kJ kmol <sup>-1</sup>
E <sub>A2</sub>	112,700 x 10 <sup>3</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	114,460 x 10 <sup>3</sup>	kJ kmol <sup>-1</sup>
E <sub>A3</sub>	106,500x 10 <sup>3</sup>	Thurner; Mann (1981, p. 486)	106,960 x 10 <sup>3</sup>	kJ kmol <sup>-1</sup>
E <sub>A4</sub>	81,000 x 10 <sup>3</sup>	Velden <i>et al.</i> (2008, p. 134)	87,531 x 10 <sup>3</sup>	kJ kmol <sup>-1</sup>
E <sub>A5</sub>	32,000 x 10 <sup>3</sup>	Melo (2012, p. 69)	43,216 x 10 <sup>3</sup>	kJ kmol <sup>-1</sup>

O modelo dinâmico final apresentou um excelente desempenho, conforme pode ser visualizado para a temperatura de 392 °C (Gráfico 1a). Procurou-se também fazer uma simulação em uma temperatura alternativa de 354 °C para testar o modelo e alcançou-se uma aproximação com os dados experimentais (Gráfico 1b).

Resultados de teste demonstram que o modelo pode ser aplicado para simulação dinâmica em outras temperaturas intermediárias ou pirólise em condições operacionais de interesse, visando definir estratégias com menores custos. As temperaturas de 392 °C e 354 °C estão relacionadas ao comportamento de uma pirólise lenta.



**Gráfico 1.** Simulação do modelo da pirólise com os dados experimentais de Thurner e Mann (1981, p. 486) em diferentes temperaturas: (a) 392 °C e (b) 354 °C, empregando os parâmetros otimizados.

Nota-se no Gráfico 1 que a dinâmica do processo ocorre de forma diferente nos dois casos. No caso de maior temperatura a dinâmica é mais rápida levando menos tempo para se chegar ao equilíbrio com formação dos produtos de interesse. Essa situação mostra que é possível através da simulação prever menores tempos de permanência em sistemas de pirólise permitindo projetar corretamente e avaliar a eficiência de conversão de biomassa das unidades de produção.

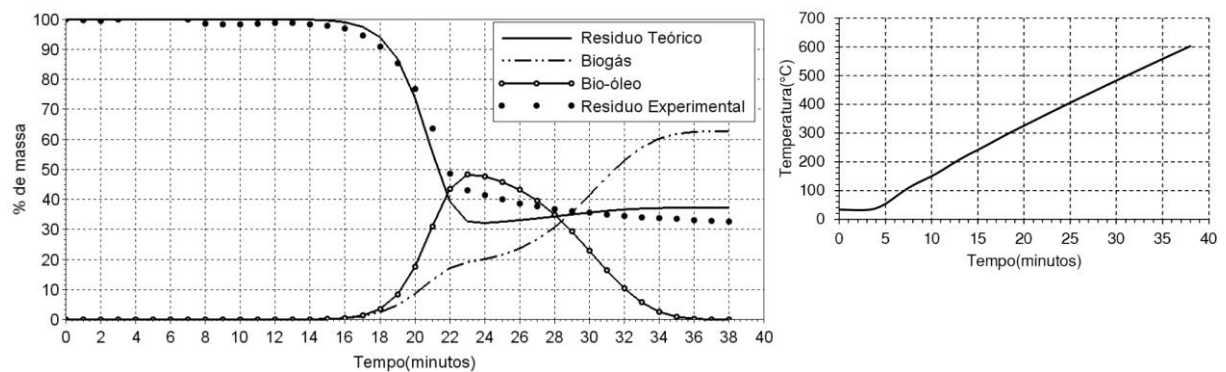
Quanto ao desempenho dos modelos frente aos dados experimentais, para a temperatura de 392 °C, os valores dos coeficientes de determinação  $R^2$  foram para o resíduo, bio-óleo e biogás aproximadamente 0,9504; 0,8689; e 0,8740, respectivamente. Os valores de F calculados (115,0534; 39,7674; e 41,6304) > F tabelado (0,0043) ao nível de significância de 5%. Para a temperatura de 354 °C, os valores de  $R^2$  determinados para o resíduo, bio-óleo e biogás, foram de 0,9615; 0,8396; e 0,7751, com F calculado (149,9756; 31,4191; e 20,6870) > F tabelado (0,0043) ao nível de significância de 5%.



Comparando as duas situações com os dados de temperatura,  $F$  calculado  $>$   $F$  tabelado, o que demonstra que o modelo é significativo e adequado para prever o comportamento da pirólise de biomassa de Carvalho nas condições operacionais simuladas.

### 3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO PARA TEMPERATURA E TEMPOS VARIÁVEIS

O Gráfico 2 ilustra o desempenho do modelo em relação aos dados experimentais e a predição na formação de outros produtos de interesse energético como biogás e bio-óleo.



**Gráfico 2.** Simulação da Análise Termogravimétrica para predição de produtos de interesse energético com a madeira de Tauari.

A Análise Termogravimétrica permite estimar os eventos térmicos que ocorrem durante a pirólise na madeira, que são normalmente distribuídos em três estágios, que se resumem à degradação da hemicelulose (200 °C - 260 °C), celulose (240 °C - 350 °C) e lignina (280 °C - 500 °C) (SJÖSTRÖM, 1992). Tais comportamentos podem ser observados nas faixas de 13 - 16, 15 - 22 e 18 - 31 minutos respectivamente para a madeira de Tauari. No processo em questão, observa-se que em torno de 18 minutos é que se atinge a temperatura suficiente para que se inicie a pirólise com a formação de produtos de interesse, tais como bio-óleo, gás e carvão vegetal. Geralmente o processo ocorre na faixa de 300 °C a 600 °C (MÜLLER *et al.*, 2013). Félix *et al.* (2017) atribuem que na fase de degradação da celulose e hemicelulose, ocorre a quebra das ligações glicosídicas dos polissacarídeos dando lugar à emissão de voláteis compostos por vapores orgânicos e altas concentrações de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, além de ácido acético, metanol e acetona, sendo que o bio-óleo começa a se tornar predominante. Já Rowell e Dietenberger (2013) resumem que a degradação da celulose conduz principalmente à formação de gases, e a lignina é atrelada principalmente à formação de bio-óleo e carvão.

Pode-se ainda observar no Gráfico 2 que o modelo prediz um crescimento na formação de bio-óleo a partir de 16 minutos de ensaio (temperatura de 258,07 °C) atingindo pico até 23 minutos (373,88 °C), acompanhado de um aumento menos pronunciado da produção de biogás,

resultados estes da degradação de hemicelulose, celulose e lignina. A porcentagem mássica de bio-óleo tende a decrescer e o biogás aumentar até 36 minutos de operação (573,03 °C). Tal característica é resultado do segundo mecanismo cinético de decomposição do bio-óleo em gases e carvão vegetal (MELO, 2012).

A análise de variância (ANOVA) para a variável resíduo de Tauari mostrou que o modelo pode ser empregado para fins de simulação e predição uma vez que o mesmo apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9841$ . Além disso, o teste F revelou que o valor de F calculado (2294,0248) > F tabelado (4,1055) com um intervalo de confiança de 95%, apontando que o modelo foi bem ajustado para esta variável, sendo este estatisticamente significativo.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo de uma proposta de um modelo com mecanismo de reação em duas etapas e ajuste de parâmetros cinéticos com os dados experimentais disponíveis na literatura, foi possível validar o mesmo para diferentes condições operacionais. Diante das análises estatísticas empregadas, o modelo foi confiável para predição da formação de produtos da pirólise para as espécies florestais de Carvalho e Tauari. Com base no desempenho do modelo, este contribuirá com o propósito de projetos de reatores, análise da eficiência de unidades industriais de pirólise, estudos de sistemas mais complexos e simulação do comportamento térmico de outras biomassas florestais.

#### REFERÊNCIAS

- BAUDIN, M.; COUVERT, V.; STEER, S. **Optimization in scilab**. Le Chesnay-Rocquencourt. The Scilab Consortium - Digiteo / INRIA, 2010. Disponível em: <https://www.scilab.org/tutorials/optimization-scilab---tutorial#>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- BRANDÃO, F. L. *et al.* Computational Study of Sugarcane Bagasse Pyrolysis Modeling in a Bubbling Fluidized Bed Reactor. **Energy and Fuels**, Washington, v. 32, n. 2, p. 1711-1723, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01603>.
- CARNEIRO, A. de C. O. *et al.* Pirólise Lenta da Madeira para a Produção de Carvão Vegetal. *In*: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H.. (org.). **Bioenergia e Biorrefinaria**. Cana de Açúcar e Espécies Florestais. Viçosa: Produção Independente, 2013. p. 429-457.
- CHIRESHE, F.; COLLARD, F. X.; GÖRGENS, J. F. Production of low oxygen bio-oil via catalytic pyrolysis of forest residues in a kilogram-scale rotary kiln reactor. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 260, p. 1-11, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120987>.
- CIESIELSKI, P. N. *et al.* Simulating Biomass Fast Pyrolysis at the Single Particle Scale. *In*: CLARK, J. H.; KRAUS, G. A.; STANKIEWICZ, A.; SIEDL, P. (org.). **Fast Pyrolysis of**

**Biomass: Advances in Science and Technology.** Cambridge: Chemistry, Royal Society of, 2017. p. 231-253. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/9781788010245-00231>.

CONESA, J. A. *et al.* Semivolatile and Volatile Compound Evolution during Pyrolysis and Combustion of Colombian Coffee Husk. **Energy and Fuels**, Washington, v. 30, n. 10, p. 7827-7833, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00791>.

CORREA, I. B.; SANTOS, L. de S. Simulação e otimização do processo de pirólise de biomassas. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, v. 4, n. 3, p. 1-14, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21575/25254782rmetg2019vol4n3863>.

DAVID, G. F. *et al.* Thermochemical conversion of sugarcane bagasse by fast pyrolysis: high yield of levoglucosan production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Netherlands, v. 133, p. 246-253, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.004>.

DIAS JUNIOR, A. F. *et al.* Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 78, n. 1, p. 193-204, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00107-019-01489-6>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2020: relatório síntese, ano base 2019.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. 73p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 19 fev. 2021.

FAHMY, T. Y. A. *et al.* Biomass pyrolysis: past, present, and future. **Environment, Development and Sustainability**, Netherlands, v. 22, n. 1, p. 17-32, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>.

FÉLIX, C. R. de O. *et al.* Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41. **Revista Materia**, Cidade Universitária, v. 22, n. supl. 1, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0251>.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

GOYAL, H. B.; SEAL, D.; SAXENA, R. C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, United Kingdom, v. 12, n. 2, p. 504-517, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>.

GUL, S. *et al.* Kinetic, volatile release modeling and optimization of torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Netherlands, v. 128, p. 44-53, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.001>.

HU, Z. *et al.* Characteristics and kinetic studies of Hydrilla verticillata pyrolysis via thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, Essex, v. 194, p. 364-372, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.007>.

LIN, B. J.; CHEN, W. H. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. **Frontiers in Energy Research**, Lausanne, v.

3, p. 1-9, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2015.00004>.

LOPES, G. de A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. de. Uso Energético de Resíduos Madeireiros na Produção de Cerâmicas no Estado de São Paulo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 679-686, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509822767>.

MARTÍN-LARA, M. A. *et al.* Kinetic modelling of torrefaction of olive tree pruning. **Applied Thermal Engineering**, United Kingdom, v. 113, p. 1410-1418, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.147>.

MELO, R. A. P. de. **Estudos Para Contribuição na Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional de Sistemas Térmicos: Processos de Gaseificação e Pirólise da Biomassa e da Combustão do Gás Natural**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11907>. Acesso em: 19 fev. 2021.

MOTA, F de A. da S. *et al.* Pyrolysis of Lignocellulose Biomass: a Review. **Revista Geintec**, São Cristóvão, v. 5, n. 4, p. 2511-2525, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.7198/s2237-0722201500040003>.

MÜLLER, N. *et al.* Pirólise Rápida da Madeira para a Produção de Bio-óleo. *In*: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (org.). **Bioenergia e Biorrefinaria**. Cana de Açúcar e Espécies Florestais. Viçosa: Produção Independente, 2013. p. 459-481.

NORAINI, M. N. *et al.* Single-route synthesis of magnetic biochar from sugarcane bagasse by microwave-assisted pyrolysis. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 184, p. 315-319, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.064>.

ÖZBAY, G.; ÖZÇİFÇİ, A.; KÖKTEN, E. S. The pyrolysis characteristics of wood waste containing different types of varnishes. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 40, n. 5, p. 705-714, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3906/tar-1502-88>.

PRAKASH, N.; KARUNANITHI, T. Kinetic Modeling in Biomass Pyrolysis - A Review. **Applied Sciences Research**, Iran, v. 4, n. 12, p. 1627-1636, 2008. Disponível em: <http://www.aensiweb.com/old/jasr/jasr/2008/1627-1636.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2021.

ROWELL, R. M.; DIETENBERGER, M. A. Thermal Properties, Combustion, and Fire Retardancy of Wood. *In*: ROWELL, R. M. (org.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. p. 127-150.

SANTIAGO, B. L. S.; RODRIGUES, F. de A. Processamento de Biomassa Lignocelulósica Para Produção de Etanol: Uma Revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 3, n. 7, p. 1011-1022, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss7pp1011-1022>.

SETTER, C. *et al.* Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, Guildford, v. 261, p. 1-11, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>.

SHAFIZADEH, F.; CHIN, P. P. S. Thermal Deterioration of Wood. *In*: GOLDSTEIN, I. S. (org.). **Wood Technology: Chemical Aspects**, Washington. p. 57-81, 1977. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/bk-1977-0043.ch005>.

SJÖSTRÖM, E. Wood-based Chemicals and Pulping by Products. *In*: WOOD chemistry: fundamentals and applications. 2. ed. Cambridge: Academic Press, Inc., 1992. p. 225-248.

TANG, S. *et al.* Product characteristics and kinetics of sewage sludge pyrolysis driven by alkaline earth metals. **Energy**, Oxford, v. 153, p. 921-932, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.108>.

TANG, S.; ZHENG, C.; ZHANG, Z. Effect of inherent minerals on sewage sludge pyrolysis: Product characteristics, kinetics and thermodynamics. **Waste Management**, Elmsford, v. 80, p. 175-185, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.012>.

THURNER, F.; MANN, U. Kinetic Investigation of Wood Pyrolysis. **Industrial and Engineering Chemistry Process Desing and Development**, Washington, v. 20, n. 3, p. 482-488, 1981. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/i200014a015>.

VELDEN, M. V. de; BAEYENS, J.; BOUKIS, I. Modeling CFB biomass pyrolysis reactors. **Oxford**, v. 32, n. 2, p. 128-139, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.08.001>.

WEI, L. *et al.* Nitrogen Transformation during Sewage Sludge Pyrolysis. **Energy and Fuels**, Washington, v. 29, n. 8, p. 5088-5094, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00792>.

YEO, J. Y. *et al.* Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. **Journal of the Energy Institute**, United Kingdom, v. 92, n. 1, p. 27-37, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.003>.