

# Engenharias, Ciência e Tecnologia 4

Luís Fernando Paulista Cotian  
(Organizador)



**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**Luís Fernando Paulista Cotian**

(Organizador)

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia**

## **4**

Atena Editora

2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 4 [recurso eletrônico] / Organizador  
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 4)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-087-2

DOI 10.22533/at.ed.872193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.  
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de  
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos  
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)



## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume IV apresenta, em seus 29 capítulos, conhecimentos relacionados a Modelagem, Análise e Simulação relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Programação Matemática, Decisão Multicriterial e Teoria da Decisão e Teoria dos Jogos.

A área temática de Modelagem, Análise e Simulação trata de temas relevantes para a mecanismos que auxiliam na tomada de decisão, desde a modelagem e simulação até a análise dos resultados envolvendo assuntos relacionados a engenharia. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Modelagem, Análise e Simulação e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
A UTILIZAÇÃO DE UM SOFTWARE PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA	
<i>Douglas Freitas Augusto dos Santos</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS A OTIMIZAÇÃO OFF-LINE DE UM MAPA COGNITIVO FUZZY DE UM MISTURADOR INDUSTRIAL	
<i>Márcio Mendonça</i>	
<i>Edson Hideki Koroishi</i>	
<i>Lillyane Rodrigues Cintra</i>	
<i>Lucas Botoni de Souza</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>19</b>
APLICAÇÕES MATEMÁTICAS EM MEDIDAS AGRÁRIAS: UM CONHECIMENTO ETNOMATEMÁTICO DO HOMEM DO CAMPO CONTEXTUALIZADO COM O CONTEÚDO ESCOLAR	
<i>Deonísio Hul</i>	
<i>Silton José Dziadzio</i>	
<i>Clodogil Fabiano Ribeiro dos Santos</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>34</b>
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA CONEXÃO DE UMA UNIDADE GERADORA DISTRIBUÍDA A UM ALIMENTADOR DE 13,8 KV UTILIZANDO O ATP	
<i>Jaqueline Oliveira Rezende</i>	
<i>Larissa Marques Peres</i>	
<i>Geraldo Caixeta Guimarães</i>	
<i>Marcelo Lynce Ribeiro Chaves</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>46</b>
CÁLCULO FRACIONÁRIO APLICADO À GENERALIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE BAGAÇO DE UVA	
<i>Amanda Peruzzo da Motta</i>	
<i>Bruna de Souza Nascimento</i>	
<i>Fernanda Batista de Souza</i>	
<i>Douglas Junior Nicolin</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>57</b>
CINÉTICA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO BAGAÇO DE CANA	
<i>Edvan Vinícius Gonçalves</i>	
<i>Wardleison Martins Moreira</i>	
<i>Emanuel Souza Barros</i>	
<i>Sérgio Inácio Gomes</i>	
<i>Marcos de Souza</i>	
<i>Luiz Mario de Matos Jorge</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8721931016</b>	

**CAPÍTULO 7 ..... 67**

CONTAGEM AUTOMÁTICA DE OVOS DO AEDES AEGYPTI EM PALHETAS DE OVITAMPAS: UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

*Carlos Diego Franco da Rocha*  
*Ayla Márcia Cordeiro Bizerra*  
*Demétrios Araújo Magalhães Coutinho*  
*Luiz Fernando Virginio da Silva*  
*Michel Santana de Deus*  
*Phablo Márcio de Paiva Souto*

**DOI 10.22533/at.ed.8721931017**

**CAPÍTULO 8 ..... 75**

CONTROLADOR FUZZY MAMDANI APLICADO À NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA EM AMBIENTE DESCONHECIDO VARIANTE NO TEMPO

*Eduardo Vilela Pierangeli*  
*Jordann Alessander Rosa Almeida*  
*Marcelo Vilela Pierangeli*

**DOI 10.22533/at.ed.8721931018**

**CAPÍTULO 9 ..... 82**

CONTROLE ROBUSTO APLICADO EM UMA VIGA DE MATERIAL COMPÓSITO VISANDO ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

*Camila Albertin Xavier da Silva*  
*Daniel Almeida Colombo*  
*Edson Hideki Koroishi*  
*Albert Willian Faria*

**DOI 10.22533/at.ed.8721931019**

**CAPÍTULO 10 ..... 96**

ESTRATÉGIAS HEURÍSTICAS PARA POSICIONAMENTO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

*Marcio André Ribeiro Guimaraens*  
*Julio Cesar Stacchini de Souza*  
*Milton Brown Do Coutto Filho*  
*Breno Crespo Zeba*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310110**

**CAPÍTULO 11 ..... 109**

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA URBANIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SOUSA-PB NO PERÍODO DE 1984 A 2016

*Márcia de Lacerda Santos*  
*Thayse Bezerra da Silva*  
*Maria Raiana Almeida Silva*  
*Danielle Leal Barros Gomes*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310111**

**CAPÍTULO 12 ..... 116**

FLAMBAGEM LINEAR E NÃO-LINEAR UTILIZANDO UMA ANÁLISE NUMÉRICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

*Rodrigo Villaca Santos*  
*Leticia Barizon Col Debella*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310112**

**CAPÍTULO 13..... 121**

GEOLOGIA DA SERRA DO CARAÇA: PERFIS REAIS

*Carolina Cristiano Barbosa*  
*Ariadne Duarte Libutti Nuñez*  
*Adriane Abreu Cadar*  
*Alexandre Motta Tunes*  
*Bárbara Alves Oliveira*  
*Ulisses Cyrino Penha*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310113**

**CAPÍTULO 14..... 132**

GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO: PREVISÃO DE COMPORTAMENTO ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

*Josué Domingos da Silva Neto*  
*Débora Cristina Almeida de Assis*  
*Nayra Vicente Sousa da Silva*  
*Zenilda Vieira Batista*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310114**

**CAPÍTULO 15..... 143**

INFLUÊNCIA DA INÉRCIA A TORÇÃO NO MOMENTO FLETOR DE PLACAS MACIÇAS DE CONCRETO

*Leticia Barizon Col Debella*  
*Rodrigo Villaca Santos*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310115**

**CAPÍTULO 16..... 149**

METODOLOGIA DE CONTROLE PREVENTIVO BASEADA EM ÁRVORE DE DECISÃO PARA A MELHORIA DA SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DO SISTEMA INTERLIGADO DA ELETRONORTE

*Ubiratan Holanda Bezerra*  
*João Paulo Abreu Vieira*  
*Werboston Douglas de Oliveira*  
*Daniel Augusto Martins*  
*Dione José Abreu Vieira*  
*Bernard Carvalho Bernardes*  
*Benedito das Graças Duarte Rodrigues*  
*Vilson Castro*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310116**

**CAPÍTULO 17 ..... 166**

O WATSON DA IBM

*Eduardo Bruno de Almeida Donato*  
*Amanda Moura Camilo*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310117**

**CAPÍTULO 18..... 173**

PROTÓTIPO DE UM PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE A PARTIR DA LEI DE DARCY

*Guilherme Medina Cameu*  
*Victor Araujo Figueredo Fischer*  
*Wataru Iwamoto*  
*Rômulo Henrique Batista de Farias*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310118**

**CAPÍTULO 19 ..... 178**

SIMULADOS ELETRÔNICOS DO PROCESSO SELETIVO DO IFPR: INSTRUMENTO DE DIVULGAÇÃO E DEMOCRATIZAÇÃO DO ENSINO

*João Henrique Berssanette*  
*Antonio Carlos de Francisco*  
*Fabiane Ferreira*  
*Maria Fernanda Müller Pereira da Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310119**

**CAPÍTULO 20 ..... 188**

SOLARIZAÇÃO DO SOLO E BIOFUMIGAÇÃO NA VIABILIDADE DE SCLEROTIUM ROLFSSII

*João Luiz Lopes Monteiro Neto*  
*Roberto Tadashi Sakazaki*  
*Raphael Henrique da Silva Siqueira*  
*Carlos Abanto-Rodríguez*  
*Sonicley da Silva Maia*  
*Rannyonara Oliveira Rodrigues*  
*Lucas Aristeu Anghinoni dos Santos*  
*Beatriz Sayuri Campaner Sakazaki*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310120**

**CAPÍTULO 21 ..... 194**

SYNOPTERO: RECONSTRUINDO O MUNDO TRIDIMENSIONAL A PARTIR DO BIDIMENSIONAL

*Lucas Maquedano da Silva*  
*Marcos Cesar Danhoni Neves*  
*Fernanda Tiemi Karia*  
*Gabriel Francischini de Oliveira*  
*Leandro Moraes Azevedo*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310121**

**CAPÍTULO 22 ..... 202**

TENDÊNCIAS CLIMATOLÓGICAS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO SUL DE MINAS GERAIS, BRASIL

*Lucas Rosa de Almeida*  
*Marcelo Vieira-Filho*  
*Sílvia Yanagi*  
*Marcelo Ribeiro Viola*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310122**

**CAPÍTULO 23 ..... 217**

TEORIA NA PRÁTICA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS PRINCIPAIS PARTIDAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

*Murilo Miceno Frigo*  
*Paulo Irineu Koltermann*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310123**

**CAPÍTULO 24 ..... 229**

UM ALGORITMO ITERATED LOCAL SEARCH PARA O STABLE MATCHING PROBLEM APLICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ALUNOS NAS ESCOLAS DA REDE PÚBLICA DE ENSINO

*Robson Vieira de Oliveira*  
*Matheus Correia Teixeira*  
*Marco Antonio Bonelli Junior*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310124**



**CAPÍTULO 25 ..... 242**

USO DE IMAGENS SENTINEL - 2A E O ALGORITMO SVM PARA MONITORAR AS APP DE NASCENTES E CURSOS D'AGUA DO RIBEIRÃO MARANHÃO, LAVRAS, MG

*Ester Afonso*  
*Katyanne Conceição*  
*Beatriz Campos*  
*Franklin Inácio*  
*Margarete Volpato*  
*Helena Alves*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310125**

**CAPÍTULO 26 ..... 249**

UTILIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIAL EM PROBLEMAS INVERSOS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE UMA VIGA EULER-BERNOULLI

*Rennan Otavio Kanashiro*  
*Edson Hideki Koroishi*  
*Fabian Andres Lara-Molina*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310126**

**CAPÍTULO 27 ..... 258**

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) PARA O ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PAINÉIS DE MADEIRA COMPENSADA

*Eduardo Hélio de Novais Miranda*  
*Rodrigo Allan Pereira*  
*Francisco Carlos Gomes*  
*Roberto Alves Braga Junior*  
*Fernando Pujaico Rivera*  
*Lucas Henrique Pedrozo Abreu*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310127**

**CAPÍTULO 28 ..... 264**

UTILIZAÇÃO DO SENSOR PT100 NO ARDUINO PARA CAPTAÇÃO DA TMR

*Mariana Espíndola Vieira*  
*Helena Dufau*  
*Christian Muller*  
*Anderson Ferrugem*  
*Antonio Silva*  
*Rafael Soares*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310128**

**CAPÍTULO 29 ..... 269**

DINÂMICA DE ESCOAMENTOS PARTICULADOS EM DUTOS VERTICAIS

*Diego Nei Venturi*  
*Francisco José De Souza*

**DOI 10.22533/at.ed.87219310129**

**SOBRE O ORGANIZADOR ..... 280**

## CINÉTICA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO BAGAÇO DE CANA

### **Edvan Vinícius Gonçalves**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

### **Wardleison Martins Moreira**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

### **Emanuel Souza Barros**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

### **Sérgio Inácio Gomes**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

### **Marcos de Souza**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

### **Luiz Mario de Matos Jorge**

Universidade Estadual de Maringá, Departamento  
de Engenharia Química  
Maringá – Paraná

**RESUMO:** Este trabalho examinou a cinética de degradação térmica do bagaço de cana-de-açúcar em meio reduzido e em condição não isotérmica. Os resultados mostraram que o modelo que melhor representa os dados experimentais é expresso pelo mecanismo

reacional de 3<sup>a</sup> ordem. As diferenças nos desvios em relação aos outros modelos que consideram reações químicas foram desprezíveis do ponto de vista do ajuste de parâmetros e da simulação. **PALAVRAS-CHAVE:** Degradação térmica. Cinética. Modelagem. Simulação. Otimização.

**ABSTRACT:** This work studied the thermal degradation kinetics of sugarcane bagasse carried out in reduced medium and for non-isothermal condition. The results showed the model that best represents experimental data is expressed by 3<sup>rd</sup> order reaction mechanism. Differences in deviations from other models considering chemical reactions were negligible from the point of view of parameter adjustment and simulation.

**KEYWORDS:** Thermal degradation. Kinetics. Modeling. Simulation. Optimization.

## 1 | INTRODUÇÃO

No mundo há uma contínua preocupação quanto à eficácia futura no abastecimento de todas as atividades requerentes de energia, incluindo meios de transporte, aplicações industriais e abastecimento de comércios, meios de serviços e residências, entre outros. A situação momentânea manifesta, sistematicamente, uma dependência massificada de fontes não

renováveis de energia, sobretudo dos combustíveis fósseis. Logo, há uma 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 todos os esforços ligados à proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável.

A degradação térmica da biomassa para a obtenção de energia e carvão apresenta inúmeras vantagens. 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, e na disposição final de resíduos de indústrias, de colheitas, de florestas, de lodo de esgoto, de estrume de porco e de algas, entre outros. Do ponto de vista técnico e econômico, a conversão da biomassa possui um amplo quadro de possibilidades quando integrada a plantas industriais geradoras de resíduos. Esta opção torna exequível a otimização energética e econômica das etapas de formação e de utilização dos vários produtos e subprodutos (SOLANTAUSTA *et al.*, 2012; OASMAA *et al.*, 2010; MEIER *et al.*, 2013; HAMEED *et al.*, 2007). Desse modo, firmados os passos da viabilidade técnica, abre-se caminho para um vasto proveito econômico, comportando, dessa maneira, a diminuição da dependência do petróleo, essencialmente o estrangeiro (MOHAN *et al.*, 2006), e a baixa dos custos praticados pelas indústrias empregadoras de carvão ativado (DIAS *et al.*, 2007).

A pirólise consiste no processo de decomposição termoquímica da biomassa em atmosfera inerte. Este tipo de processo resulta na transformação da biomassa 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). É importante ressaltar que tanto o rendimento quanto as características químicas e físicas do bio-óleo, do carvão e dos gases gerados a partir do processo pirolítico estão intimamente ligados 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 *et al.*, 2006).

O desenvolvimento de equipamentos adequados para a conversão termoquímica da biomassa requer uma visão mais aprofundada sobre a cinética e o mecanismo de decomposição térmica da biomassa. Considerando 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 visou investigar o comportamento do bagaço de cana durante a degradação térmica e avaliar modelos cinéticos para este processo.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dados de Análise Termogravimétrica (ATG) são empregados com freqüência para a determinação de parâmetros cinéticos. Análises matemáticas de mínimos quadrados podem ser aplicadas para obtenção dos ajustes dos parâmetros conforme a seguinte expressão (VÁRHEGYI *et al*, 1997):

$$S_{min} = \sum_{i=1}^N (X_{i_{calc}} - X_{i_{exp}})^2 \quad (1)$$

em que  $S_{min}$  é a função objetivo a ser reduzida,  $X_{i_{calc}}$  é o valor da variável resposta calculada por meio de modelo matemático,  $X_{i_{exp}}$  é o valor da variável resposta advinda do experimento,  $i$  representa o índice da  $i$ ésima observação experimental e  $N$  é o número total de observações.

O desvio entre os valores calculados e os resultados experimentais também podem ser obtido com função normalizada em relação ao maior valor calculado, onde:

$$Devio(\%) = 100 \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (X_{i_{calc}} - X_{i_{exp}})^2 / N \right]^{1/2}}{X_{max}} \quad (2)$$

em que  $X_{max}$  representa o maior valor experimental obtido.

Do ponto de vista teórico, uma grande variedade de reações complexas podem ser consideradas na pirólise da biomassa. A biomassa é composta essencialmente de hemicelulose, celulose e lignina. A pesquisa realizada por Yang *et al.* (2007) estudou as características da degradação térmica destes três materiais separadamente e constataram que seus processos podem ser divididos em quatro etapas: Vaporização da umidade, decomposição da hemicelulose, decomposição da celulose e por fim decomposição da lignina. Segundo Mohan *et al.* (2006), a quebra da celulose resulta principalmente em açúcares e levoglucosano, a hemicelulose é transformada principalmente em compostos mais voláteis e menos alcatrão do que a celulose e resulta na maiores quantidades de ácidos carboxílicos e gases não condensáveis, enquanto o produto advindo da lignina é formado essencialmente por compostos aromáticos (OASMAA, SOLANTAUSTA *et al.*, 2010).

O modelo frequentemente empregado para tentar explicar a cinética de reação para operações não isotérmicas são descritos pela seguinte equação (VLAEV *et al.*, 2003; SENNECA, 2007; VARHEGYI e ANTAL, 1989):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (3)$$

em que  $f(\alpha)$  é uma função que depende do mecanismo de reação e está

representada na Tabela 1,  $k(T)$  é a constante de reação dependente da temperatura absoluta  $T$ ,  $t$  é o tempo e  $\alpha$  representa o grau de transformação do material. O valor de  $\alpha$  pode ser obtido por meio da seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f} \quad (4)$$

em que  $m_0$ ,  $m_t$  e  $m_f$  são as massas inicial, atual e final da amostra respectivamente.

MECANISMO	$f(\alpha)$
<b>Reação Química</b>	
1ª ordem	$1 - \alpha$
2ª ordem	$(1 - \alpha)^2$
3ª ordem	$(1 - \alpha)^3$
Ordem n	$(1 - \alpha)^n$

Tabela 1: Expressões algébricas de funções para mecanismos de reações de estado sólido.

Usualmente a constante de reação e sua dependência com a temperatura pode ser descrita por meio de equação do tipo Arrhenius, como segue:

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

em que  $A$  é o fator de frequência,  $E$  representa a energia de ativação e  $R$  a constante universal dos gases.

Para situações em que a taxa de aquecimento é constante ( $dT/dt = q$ ) e após substituições e transformações, a Equação 3 pode ser transformada na seguinte expressão:

$$\frac{d\alpha}{dT} = q A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (6)$$

### 3 | METODOLOGIA

O bagaço cru foi gentilmente fornecido por uma usina da região com umidade de 24 % e seu preparo se deu mediante secagem em estufa com circulação de ar a 65 °C por 24 h, trituração e peneiramento.

As análises termogravimétricas foram realizadas no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Utilizou-se um Analisador Termogravimétrico com DSC modelo STA 409 PC/PG da empresa NETZSCH contendo cadinho de platina e amostras de bagaço (5 a 10 mg). A amostra



de bagaço foi aquecida a uma taxa de 10 °C/min com a temperatura variando de 25 a 800 °C e com vazão de inerte (N<sub>2</sub>) de 40 mL/min.

## 4 | RESULTADOS

### 4.1. Caracterização do Bagaço de Cana

A Tabela 2 demonstra os resultados das propriedades físicas e químicas do bagaço. Detalhes da caracterização das propriedades do bagaço podem ser obtidos em Gonçalves *et al.* (2017).

O resultado da ATG do bagaço está demonstrado na Figura 1A. Por meio desta análise é possível notar que há um pico de desidratação em torno da temperatura de 100 °C e a degradação térmica só se completa a temperaturas acima de 400 °C com patamar constante ocorrendo somente a partir de 600 °C.

Propriedade	Valor
ANÁLISE CENTESIMAL	
Teor de Umidade (%) *6	9,02 ± 0,41
Fração Volátil (%) *3	76,88 ± 0,46
Carbono Fixo (%) *d	10,24 ± 1,82
Teor de Cinzas (%) *3	3,86 ± 1,81
COMPOSIÇÃO (Base Seca)	
Hemicelulose (%) *3	28,58 ± 0,65
Celulose (%) *d	39,41 ± 1,05
Lignina (%) *3	16,40 ± 0,63
Extratos (%) *3	11,38 ± 0,50
Cinzas (%) *3	4,23 ± 0,20

\*2, \*3 e \*6 Número de ensaios das determinações. \*d Resultado obtido por diferença.

Tabela 2: Propriedades do Bagaço de Cana.

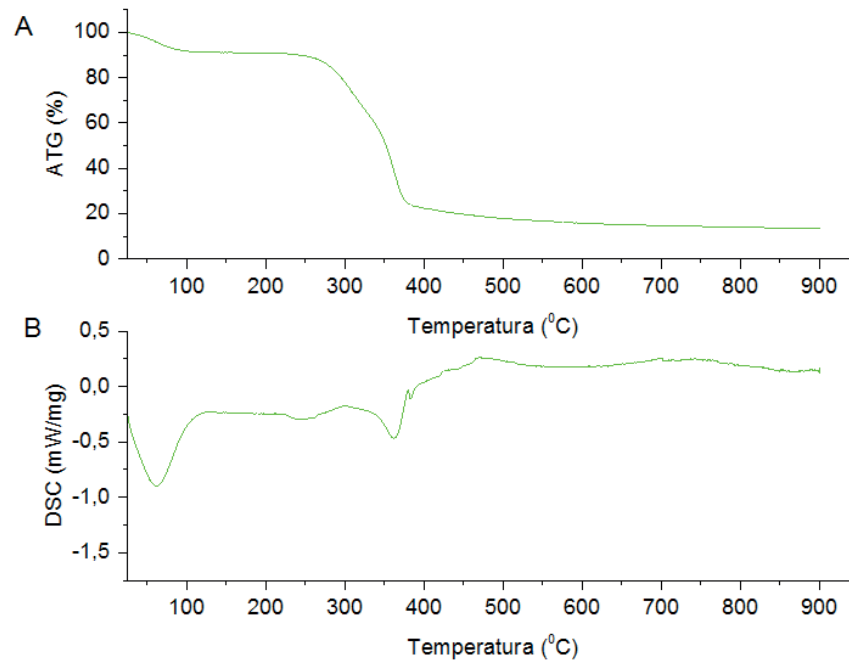


Figura 1: A) ATG do Bagaço. B) DSC do Bagaço.

A curva de DSC (Figura 1B) mostra um comportamento endotérmico para a degradação térmica do bagaço na faixa de temperatura de 25 °C a aproximadamente 425 °C. A partir desta temperatura a degradação do material passa a mostrar estabilidade e comportamento levemente exotérmico. Este perfil ocorre em virtude da composição da biomassa e seu comportamento durante a degradação térmica.

#### 4.2. Modelos Cinéticos

Os parâmetros cinéticos da degradação térmica do bagaço de cana foram obtidos por meio da Equação 6 e das funções representadas na Tabela 1. Os ajustes e simulações foram realizados por meio da rotina *fminsearch* do *software* Matlab e os resultados estão demonstrados na Tabela 3.

MECANISMO	$E_a$ (kJ/mol)	$\log A$ ( $\log s^{-1}$ )	$n$	Desvio alfa (%)
<b>Reação Química</b>				
1ª ordem	72,40	11,84	1,00	0,081
2ª ordem	92,83	16,49	2,00	0,056
3ª ordem	126,40	23,82	3,00	0,053
Ordem n	87,83	15,36	1,79	0,057

Tabela 3: Resultados das simulações.

Por meio desta tabela fica evidente que os menores desvios ocorreram para os

modelos de mecanismo governado para reação química de 3ª ordem (0,053%), com  $E_a$  de 126 kJ/mol e logA de 23,82. Resultados semelhantes a estes foram reportados por Senneca (2007), com ordem de reação igual a 3, a energia de ativação foi computada como sendo 142 kJ/mol e logA de 25,51 para a degradação de cascas de sementes de pinheiro. Esta pesquisa ainda mostrou um ajuste com ordem 3,6, energia de ativação de 121 kJ/mol e logA de 20,91 para a pirólise de lascas de madeira.

Estes resultados contrastam com Varhegyi e Antal (1989) que afirmam que para decomposições de sólidos orgânicos, a abordagem mais plausível parece ser o pressuposto de um modelo cinético de reação elementar de 1ª ordem, sendo que as reações de 2ª ordem são prejudicadas na fase sólida. Além disso, os autores afirmam que a hipótese de reações de superfície requerem razões físicas ou químicas especiais e por isso a taxa de reação deve ser maior nas superfícies do que nas outras partes da amostra.

As Figuras 4 e 5 demonstram os resultados gráficos da variação de  $\alpha$  e de  $\ln(1-\alpha)$  com a temperatura, respectivamente, do melhor modelo ajustado (mecanismo de reação química de 3ª ordem).

Por meio das Figuras 2 e 3 é possível perceber que o modelo de reação química de 3ª ordem ajusta muito bem os dados experimentais.

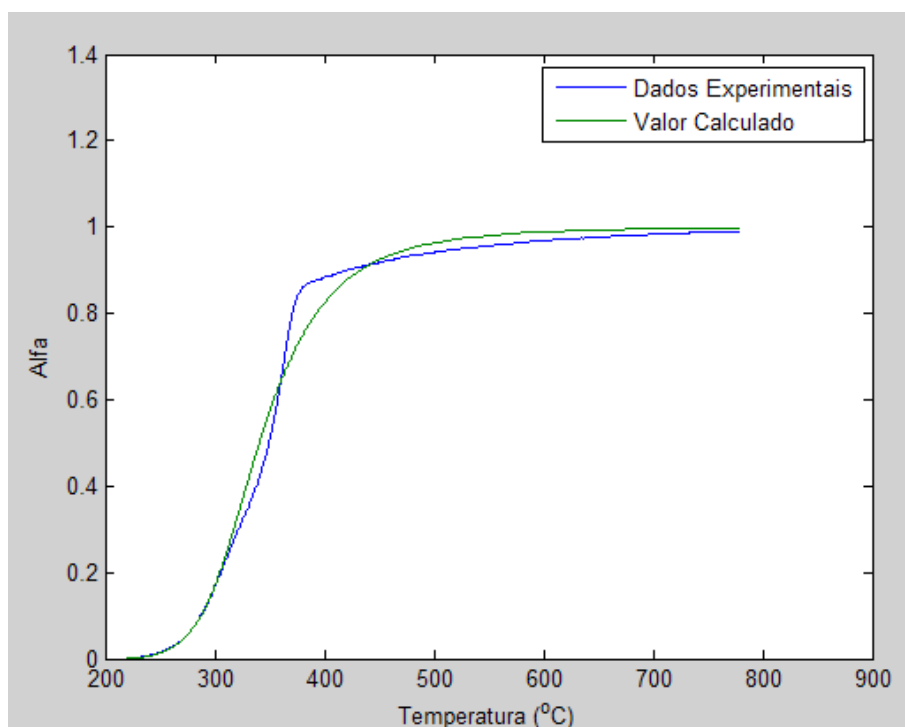


Figura 2: Variação do perfil de alfa segundo o modelo de reação química de 3ª ordem.

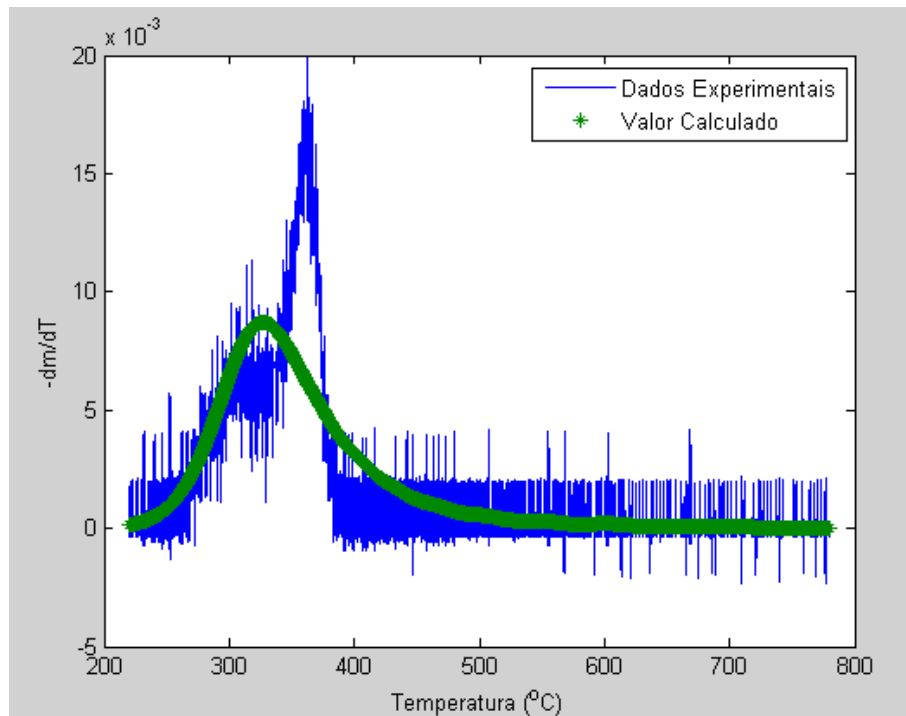


Figura 3: Taxa de variação da massa segundo o modelo de reação química de 3ª ordem.

## 5 | CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho foi possível conhecer modelos matemáticos que descrevem a cinética de degradação térmica da biomassa. Também foi possível avaliar os parâmetros dos modelos cinéticos da degradação do bagaço de cana por meio da aplicação do método de mínimos quadrados nos dados advindos da análise termogravimétrica do bagaço de cana.

Grande parte dos resultados obtidos matematicamente mostrou ser capaz de representar satisfatoriamente os dados experimentais. O modelo que gerou menores desvios entre os valores calculados e os resultados experimentais é expresso pelo mecanismo reacional de 3ª ordem. Porém as diferenças nos desvios em relação aos outros modelos que consideram reações químicas foram desprezíveis do ponto de vista do ajuste de parâmetros e da simulação.

## 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.

DIAS, J. M.; FERRAZ, A.; ALMEIDA, M. F.; UTRILLAB, J. R.; POLO, M. S. **Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review**. Journal of Environmental Management, v. 85, p. 833-846, 2007.

GARCÍA-PEREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C. **Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 65, p. 111-136, 2002.

GONÇALVES, E. V.; SEIXAS, F. L.; SANTANA, L. R. S. S.; SCALIANTE, M. H. N. O.; GIMENES, M. L. **Economic trends for temperature of sugarcane bagasse pyrolysis.** Can. J. Chem. Eng., v. 95, p. 1269–1279, 2017.

HAMEED, B. H.; DIN, A. T. M.; AHMAD, A. L. **Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies.** Journal of Hazardous Materials, v. 141, p. 819-825, 2007.

JAYARAMAN, K.; GOKALP, I. (2015). **Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge.** Energy Conversion and Management, v. 89, p. 83-91, 2015.

KUPPENS, T.; VAN DAEL, M.; VANREPPELEN, K.; CARLEER, R.; YPERMAN, J.; SCHREURS, S.; VAN PASSEL, S. **Techno-Economic Assessment of Pyrolysis Char Production and Application – A Review.** Chemical Engineering Transactions, v. 37, 2014.

LEHTO, J.; OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y.; KYTÖ, M.; CHIARAMONTI, D. **Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils.** VTT TECHNOLOGY 87, 2013.

LI, S.; XU, S.; LIU, S.; YANG, C.; LU, Q. **Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas.** Fuel Processing Technology, v. 85, p. 1201-1211, 2004.

MEIER, D.; BELD, B. V.; BRIDGWATER, A. V.; ELLIOT, D. C.; OASMAA, A.; PRETO, F. **State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 20, p. 619-641, 2013.

MOHAN, D.; PITTMAN Jr., C. U.; STEELE, P. H. **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review.** Energy & Fuels, v. 20, p. 848-889, 2006.

MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A.; GOLDBERG, N. M.; LIMA, I. M.; LAIRD, D. A.; HICKS, K. 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, A.; KUOPPALA, E.; ARDIYANTI, A.; VENDERBOSCH, R. H.; HEERES, H. J. **Characterization of Hydrotreated Fast Pyrolysis Liquids.** Energy & Fuels. V. 24, p. 5264–5272, 2010.

RADLEIN, D. QUIGNARD, A. **A Short Historical Review of Fast Pyrolysis of Biomass.** Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, v. 68, n. 4, p. 765-783, 2013.

SENNECA, O. **Kinetics of pyrolysis, combustion and gasification of three biomass fuels.** Fuel Processing Technology, v. 88, p. 87–97, 2007.

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.

TONISSI, R. H.; GOES, B.; LIMA, H. L. **Técnicas laboratoriais na análise de alimentos.** Dourados, MS: Ed. UFGD, 2010.

UDOP (União dos Produtores de Bioenergia). Boletim de Conjuntura Energética. (2014). Disponível em: <[http://www.udop.com.br/download/estatistica/biomassa/2014\\_balanco\\_bagaco\\_cana\\_uso\\_energetico.pdf](http://www.udop.com.br/download/estatistica/biomassa/2014_balanco_bagaco_cana_uso_energetico.pdf)>. Acesso em: 2 jun. de 2015.



VÁRHEGYIA, G.; ANTAL, M. J. **Kinetics of the Thermal Decomposition of Cellulose, Hemicellulose, and Sugar Cane Bagasse.** Energy & Fuels, v. 3, p. 329-335, 1989.

VÁRHEGYIA, G.; ANTAL, M. J.; JAKABA, E.; SZABÓ, P. **Kinetic modeling of biomass pyrolysis.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 42, p. 73-87, 1997.

VLAEV, L. T.; MARKOVSKA, I. G.; LYUBCHEV, L. A. **Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk.** Thermochimica Acta, v. 406, p. 1-7, 2003.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** Fuel, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-087-2

