

Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

Atena
Editora

Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miraniide Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alessandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFRP
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª Ma. Thatiany Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvío Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Desenvolvimento e transferência de tecnologia na engenharia química 2

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizador: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D451 Desenvolvimento e transferência de tecnologia na engenharia química 2 / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-922-6

DOI 10.22533/at.ed.226211904

1. Engenharia química. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.

CDD 660

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

APRESENTAÇÃO

Este e-book intitulado: “Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2” é composto por dezoito capítulos de livros que foram organizados e divididos em três áreas temáticas: (i) minerais e materiais lignocelulósicos; (ii) aplicações industriais e (iii) aplicação de tecnologias avançadas de tratamento com destaque para os processos oxidativos avançados (POAs).

A primeira temática é constituída por oito trabalhos que apresentam estudos de utilização de resíduos como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos e a obtenção de materiais de elevado custo e aplicabilidade a partir de matéria-prima mais abundante e economicamente mais acessível. Além disso, apresenta um trabalho que descreve um procedimento experimental para a escolha mais adequada e viável de uma biomassa de origem vegetal que pode apresentar características de um adsorvente e vir a ser utilizado tanto na forma *in natura* quanto modificada quimicamente, objetivando-se a remoção de compostos inorgânicos e orgânicos em diferentes matrizes aquosas. Neste sentido, trabalhos que investigaram a capacidade de remoção de poluentes utilizando minerais (argila) e biomassas vegetais (ricas em celulose e/ou lignina) apresentaram resultados satisfatórios em relação aos compostos-alvo de interesse, com destaque para a remoção do metal cromo hexavalente (Cr^{6+}) e fósforo e nitrogênio amoniacal que provocam a eutrofização de corpos aquáticos e morte de toda a biota.

O segundo tema está associado à aplicação dos conhecimentos de química e engenharia em diferentes seguimentos: (i) alimentação e (ii) processos industriais. No setor de alimentos é apresentado um trabalho que trata da avaliação microbiológica de biscoitos e empanados processados com filé de carpa Húngara, bastante abundante no estado de Santa Catarina. Já em processos industriais é apresentado um estudo que avalia o melhor dimensionamento de um condensador de amônia que possui grandes aplicações em diferentes seguimentos industriais; um estudo que avalia e compara os reatores CSTR e PFR para a produção de combustível proveniente de fontes renováveis e por fim um estudo de caso que avaliou a utilização de biometano em frotas de ônibus de seis cidades do estado de São Paulo.

A última temática trata da aplicação de diferentes POAs (Fenton e fotocatalise heterogênea tanto com o trióxido de tungstênio dopado com prata ($\text{WO}_3\text{-Ag}$) quanto o dióxido de titânio (TiO_2) para a degradação de diferentes CIEs (fármacos, microplásticos) que vem sendo reportado em trabalhos realizados em todo o mundo. No Brasil a falta de uma legislação mais restritiva associada a falta de fiscalização vem colaborando para a maior detecção e quantificação de diferentes CIEs nos diferentes compartimentos aquáticos afetando a qualidade e a sobrevivência dos diferentes organismos presentes nos inúmeros ecossistemas brasileiros.

Neste sentido, a Atena Editora vem colaborando com pesquisadores de todas as áreas do conhecimento possibilitando a divulgação de seus trabalhos e contribuindo com a disseminação destas informações de forma gratuita e acessível em diferentes plataformas digitais.

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE LAMA ABRASIVA PROVENIENTE DO CORTE DE GRANITO NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

Adriel Martins da Silva
Keina Dalila dos Santos
Luan Regio Pestana
Luís Ramon Silva Ferreira
Façal Gazel

DOI 10.22533/at.ed.2262119041

CAPÍTULO 2..... 13

VULCANIZAÇÃO COM PRODUTOS NATURAIS: UMA ANÁLISE ATRAVÉS DA MODELAGEM MOLECULAR

Helson Moreira da Costa
Valéria Dutra Ramos

DOI 10.22533/at.ed.2262119042

CAPÍTULO 3..... 40

OBTAINING GRAPHENE OXIDE FROM GRAPHITE USING THE HUMMERS METHOD

Dailson José de Queiroz Lima
Samantha Amorim Rebolledo
Everton Fabrício Franceschi
Leonardo Auco Brochetti

DOI 10.22533/at.ed.2262119043

CAPÍTULO 4..... 56

PROCEDIMENTOS ALTERNATIVOS DE ADSORÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES: UMA TRIAGEM EXPERIMENTAL

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
Bruno Elias dos Santos Costa
Nivia Maria Melo Coelho

DOI 10.22533/at.ed.2262119044

CAPÍTULO 5..... 69

UTILIZAÇÃO DE ARGILA TIPO CAULINITA IN NATURA E TRATADA SUPERFICIALMENTE NA ADSORÇÃO DE CROMO HEXAVALENTE Cr(VI)

Lenice Campos
Robert Orlando Braz Giacomini
João Batista dos Santos Magalhães de Almeida
Pedro Roberto Araújo Santos Filho
Mario Sérgio da Rocha Gomes

DOI 10.22533/at.ed.2262119045

CAPÍTULO 6..... 81

AValiação DA INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS ALCALINOS NA EXTRAÇÃO DA

LIGNINA PRESENTE NA FIBRA DO MESOCARPO DO COCO

Geovanna Miranda Teixeira

Emanuel Souza de Souza

Leila Maria Aguilera Campos

DOI 10.22533/at.ed.2262119046

CAPÍTULO 7..... 95

EL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA DE BAMBÚ ANGUSTIFOLIA “BAMBUSOIDEAE” FACTOR DETERMINANTE DEL PORCENTAJE DE CELULOSA EXTRAIDO

Willam Esparza

Luis Chamorro

Wilson Herrera

DOI 10.22533/at.ed.2262119047

CAPÍTULO 8..... 105

OTIMIZAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO E NITROGÊNIO AMONÍACAL POR LIGNINA

Lenice Campos

Bárbara Leticia Peroni

João Batista dos Santos Magalhães de Almeida

Pedro Roberto Araújo Santos Filho

Mario Sérgio da Rocha Gomes

DOI 10.22533/at.ed.2262119048

CAPÍTULO 9..... 118

HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO CINÉTICO E MODELAGEM SEMI-MECANÍSTICA

Gustavo Batista

Renata Beraldo Alencar de Souza

Antonio José Gonçalves Cruz

DOI 10.22533/at.ed.2262119049

CAPÍTULO 10..... 126

APLICAÇÃO DE WETLANDS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Camila Daniely Costa

Daylaine Aguiar Santos

Manfredo Frederico Felipe Hoppe

DOI 10.22533/at.ed.22621190410

CAPÍTULO 11..... 141

AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA DE BISCOITOS E EMPANADOS PROCESSADOS COM E SEM GLÚTEN A PARTIR DE FILÉ DE CARPA HÚNGARA (*CYPRINUS CARPIO*)

Arthur Mateus Schreiber

Alessandro Hermann

DOI 10.22533/at.ed.22621190411

CAPÍTULO 12..... 148

DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CONDENSADOR DE AMÔNIA DO TIPO PLACA

EM ESPIRAL

Maria Clara de Carvalho Aguiar
Alex Vazzoler

DOI 10.22533/at.ed.22621190412

CAPÍTULO 13..... 157

ANÁLISE COMPARATIVA DO USO DOS REATORES CSTR E PFR PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Gabriella Santos Soares
Sabrina Rodrigues da Silva

DOI 10.22533/at.ed.22621190413

CAPÍTULO 14..... 171

BIOMETHANE FROM LANDFILL GAS IN URBAN BUS FLEETS: STUDY CASE IN SIX CITIES IN ARC, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Mauro Donizeti Berni
Paulo Cesar Manduca
Ivo Leandro Dorileo
Leonardo G. de Vasconcelos

DOI 10.22533/at.ed.22621190414

CAPÍTULO 15..... 180

REAGENTES FENTON: TÉCNICA ANALÍTICA PARA PRÉ-TRATAMENTO DE AMOSTRAS DE ÁGUAS RESIDUAIS CONTAMINADAS POR MICROPLÁSTICOS

Andressa Rossatto
Maurício Zimmer Ferreira Arlindo
Taiana Denardi de Souza
Christiane Saraiva Ogradowski

DOI 10.22533/at.ed.22621190415

CAPÍTULO 16..... 184

UTILIZAÇÃO DE MATERIAS BIOADSORVENTES PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS CONTAMINADAS E REDUÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS

José Henrique Hammerschmidt Muhlbeier
Luís Fernando Cusioli
Laiza Bergamasco Beltran
Rosângela Bergamasco

DOI 10.22533/at.ed.22621190416

CAPÍTULO 17..... 194

SÍNTESE E AVALIAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE WO₃-Ag PARA FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA NA DEGRADAÇÃO DE ACETAMINOFENO

Beatriz Lara Diego dos Reis Fusari
Antonio Carlos Silva Costa Teixeira
Priscila Hasse Palharim

DOI 10.22533/at.ed.22621190417

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 18..... | 207 |
| DEGRADAÇÃO DA AMOXICILINA POR PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO EM REATOR CONTÍNUO COM TiO₂ FIXADO AO LEITO | |
| Bruno Rampanelli Dahmer | |
| Sabrina Grando Cordeiro | |
| Giovana Wanessa Franke Bohn | |
| Jéssica Adriane Barth | |
| David Green | |
| Eduardo Miranda Ethur | |
| Elisete Maria de Freitas | |
| Gustavo Reisdorfer | |
| Lucélia Hoehne | |
| DOI 10.22533/at.ed.22621190418 | |
| SOBRE O ORGANIZADOR..... | 218 |
| ÍNDICE REMISSIVO..... | 219 |

HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO CINÉTICO E MODELAGEM SEMI-MECANÍSTICA

Data de aceite: 01/04/2021

Data de submissão: 15/03/2021

Gustavo Batista

Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
São Carlos, SP
<http://lattes.cnpq.br/8836630048612519>

Renata Beraldo Alencar de Souza

Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
São Carlos, SP
<http://lattes.cnpq.br/8409898535548523>

Antonio José Gonçalves Cruz

Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
São Carlos, SP
<http://lattes.cnpq.br/1812806190521028>

RESUMO: Diferentes cargas de enzimas foram utilizadas para a hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar pré-tratada hidrotermicamente. Os experimentos foram realizados em frascos de Erlenmeyers (volume de 250 ml) mantidos a 50 °C e alíquotas de 1 mL foram coletadas nos tempos experimentais de 1, 2, 6, 12, 24, 48 e 72 h. As cinéticas de hidrólise enzimática foram modeladas empregando-se os modelos semi-mecanísticos de Michaelis-Menten, Michaelis-Menten Modificado e Chrastil. Os resultados mostraram que os modelos de Michaelis-Menten e Michaelis-Menten Modificado não representaram bem os dados experimentais

quando do uso de cargas enzimáticas iniciais elevadas. Os efeitos inibitórios pelo produto (glicose) foram parametrizados, e a inibição foi mais significativa em altas cargas de enzimas devido à maior formação de ligações não-produtivas. Foi notável a presença de elevada resistência difusiva estrutural em todos os casos avaliados. Pode-se afirmar que a utilização de modelos cinéticos semi-mecanísticos simples obteve bons resultados para a modelagem da hidrólise enzimática nas condições avaliadas.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrólise Enzimática, Palha de Cana-de-Açúcar, Modelagem Semi-Mecanística, Cinética de Hidrólise.

ENZYMATIC HYDROLYSIS OF SUGARCANE STRAW: KINETIC STUDY AND SEMI-MECHANISTIC MODELING

ABSTRACT: Enzymatic hydrolysis of hydrothermally pretreated sugarcane straw with different enzyme loads were conducted. The experiments were carried out in Erlenmeyers flasks (250 ml volume) kept at 50 ° C. 1 ml aliquots were collected at the experimental times of 1, 2, 6, 12, 24, 48 and 72 h. Enzymatic hydrolysis kinetics were modeled using the semi-mechanistic models of Michaelis-Menten, Modified Michaelis-Menten and Chrastil. The results showed that the Michaelis-Menten and Modified Michaelis-Menten models did not represent well the experimental data when using high initial enzyme loads. The inhibitory effects of the product (glucose) were parameterized. Inhibition was more significant at high enzyme loads due to a higher number of non-productive bonds. The presence of high structural diffusive

resistance was notable in all evaluated cases. One can affirm that the use of simple semi-mechanistic kinetic models generated suitable results for the modeling of enzymatic hydrolysis under the evaluated conditions.

KEYWORDS: Enzymatic Hydrolysis, Sugarcane Straw, Semi-Mechanistic Modeling, Hydrolysis Kinetics.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores mundiais de etanol. O estado de São Paulo, na região sudeste, é responsável por mais de 60% da produção nacional do biocombustível (Unica, 2018). O bagaço e a palha de cana-de-açúcar são dois dos principais subprodutos do cultivo da cana. Atualmente, em grande parte das usinas, a palha é deixada no campo como forma de cobertura e fertilizante para o solo, enquanto que o bagaço é queimado em caldeiras para a geração de energia térmica e elétrica. O bagaço e a palha são chamados de matrizes “lignocelulósicas” porque as suas paredes celulares são compostas por três componentes majoritários: a celulose, um polímero composto por agrupamentos de moléculas de glicose e de celobiose e que possui regiões cristalinas (ou seja, de alto grau de organização e de difícil desmembramento) e regiões amorfas; a lignina, que consiste em estrutura rígida que confere bastante resistência à matriz; e a hemicelulose, um polímero amorfo que atua como uma espécie de “ligante” entre os outros dois componentes (Leal *et al.*, 2013). Em um conceito de biorrefinaria, a palha e o bagaço podem ser melhor aproveitados como matérias-primas para a produção de etanol de segunda geração (E2G) (Longati *et al.*, 2018). Porém, como a estrutura lignocelulósica é altamente recalcitrante, faz-se necessário introduzir etapas adicionais de processamento no processo produtivo, e a mais importante delas é a hidrólise enzimática.

O processo de produção de E2G se inicia com a moagem e a retirada de impurezas do bagaço e/ou da palha de cana-de-açúcar. Segue-se então com o pré-tratamento da biomassa. Esta etapa tem por objetivo reduzir a cristalinidade da fração celulósica e também a retirada de quantidades de hemicelulose e lignina, que posteriormente poderiam reduzir a acessibilidade do ataque enzimático à matriz polimérica, reduzindo o rendimento do processo. A biomassa pré-tratada segue então para a etapa de hidrólise, que pode ocorrer tipicamente pelas vias ácida ou enzimática. Esta etapa tem por objetivo o fracionamento das estruturas de celulose em açúcares monoméricos passíveis de fermentação, sendo o principal deles a glicose. O rendimento da hidrólise da biomassa é dependente de diversos fatores de processo, como temperatura, atividade das enzimas, concentração de sólidos, entre outros. Após a hidrólise, os processos de etanol de primeira e de segunda geração compartilham as instalações da biorrefinaria para a fermentação e purificação do biocombustível (Furlan *et al.*, 2015).

O uso de matérias-primas lignocelulósicas na produção de E2G tornou-se uma alternativa que poderá possibilitar o aumento da produção do biocombustível, ao mesmo

tempo em que se reduziriam os impactos ambientais do uso de combustíveis derivados do petróleo. Contudo, estudos para melhoria das viabilidades técnica, econômica e ambiental desta tecnologia ainda são necessários, pois há “gargalos” no processo produtivo que ainda não foram solucionados e que impedem a adoção em massa desta tecnologia pelas usinas do setor sucroenergético. Um dos principais “gargalos” consiste nos baixos rendimentos obtidos na etapa de hidrólise enzimática, que envolve parte significativa dos custos de produção devido ao uso de coquetéis enzimáticos específicos (Longati *et al.*, 2016).

A modelagem da etapa de hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos é um tópico desafiador. Isso se deve ao mecanismo de ação das enzimas, à complexidade das estruturas dos substratos, e à interação entre estes fatores. Contudo, o esforço para geração de modelos fenomenológicos mais detalhados não se justificaria para simular processos cujo produto é uma *commodity* de baixo custo como o etanol (Carvalho *et al.* 2013). Assim, o uso de modelos semi-mecanísticos clássicos para modelagem do processo enzimático é largamente proposto na literatura (Carvalho *et al.*, 2013; Angarita *et al.*, 2015; Pratto *et al.*, 2016). O objetivo deste trabalho foi modelar a cinética de produção de glicose a partir da hidrólise da celulose da palha de cana-de-açúcar em diferentes cargas enzimáticas. Também foi verificada a aderência de três modelos cinéticos clássicos aos dados experimentais obtidos.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada baseou-se na utilização de palha de cana-de-açúcar gentilmente doada pela Usina Itapira, localizada em Catanduva (SP). O coquetel enzimático empregado foi o *Cellic Ctec-2* doado gentilmente pela empresa Novozymes® (Araucária, PR). A atividade enzimática deste coquetel enzimático foi determinada experimentalmente empregando-se a metodologia de Ghose (1987), sendo obtido o valor de 216 unidades de papel-filtro (FPU) por mL.

Palha de cana-de-açúcar foi seca à temperatura ambiente e moída em moinho de facas até a granulometria de 3/8 mesh. Em seguida, conduziu-se pré-tratamento hidrotérmico em reator de alta pressão de 1,5 gal (*Parr Instruments*®) equipado com agitador do tipo hélice, controlador de temperatura e manta de aquecimento, em um volume de mistura de operação de 2 L. A razão entre a fração de biomassa e de água foi fixada em 1:10 (massa de palha por volume de água). O pré-tratamento foi realizado na temperatura de 195 °C por 10 minutos com agitação a 200 rpm. Ao final, o reator foi resfriado até a temperatura ambiente, e a fração de sólidos pré-tratados resultante foi lavada com água corrente e filtrada até pH neutro, a fim de retirar os compostos solúveis formados e os resíduos de hemicelulose e lignina que foram solubilizados. As caracterizações químicas da biomassa *in natura* e da biomassa pré-tratada foram realizadas seguindo a metodologia proposta por Rocha *et al.* (1997) e validada por Gouveia *et al.* (2009).

A biomassa sólida pré-tratada foi então submetida ao processo de hidrólise em Erlenmeyers de 250 mL mantidos em shaker pré-aquecido por 30 minutos a 50 °C e a 250 rpm. Foram realizados ensaios de hidrólise em duplicata, um ensaio de controle de substrato e outro de controle de enzima. Diferentes cargas de enzima foram empregadas, mantida fixa a carga de sólidos em 15% ($m_{\text{palha seca}} / \text{volume de meio reacional}$). Alíquotas de 1 mL foram coletadas nos tempos experimentais de 1, 2, 6, 12, 24, 48 e 72 h. Ao final foram conduzidas centrifugação e inativação das enzimas no sobrenadante com NaOH 0,2 M. A quantificação dos açúcares formados foi feita a partir de CLAE, sendo que a concentração de açúcares fermentescíveis formados foi determinada a partir do método da glicose equivalente, que considera as concentrações obtidas para celulose e celobiose (Souza, 2016).

Os resultados obtidos experimentalmente foram aplicados à modelagem do tipo semi-mecanística. Esta contempla a interação enzima-substrato e se utiliza de poucos parâmetros para caracterizar o sistema, sendo teoricamente superior a modelos não-mecanísticos (úteis apenas para representar experimentais em condições determinadas), mas não chegando à complexidade dos modelos funcionais, que se utilizam de parâmetros de interação molecular. Considera-se que modelos semi-mecanísticos possuem complexidade suficiente para representação de sistemas de hidrólise com relativa acurácia.

O primeiro modelo cinético avaliado foi o de Michaelis-Menten com inibição competitiva pelo produto (MI) (Equação 1). Neste, v representa a velocidade instantânea de hidrólise da celulose, $V_{\text{máx}}$ é a velocidade máxima de reação para uma dada carga enzimática ($k_2 \cdot Ce_0$), S é a concentração de substrato (celulose), P é a concentração de produto (glicose), K_m é a constante de Michaelis-Menten, e K_{ic} é a constante de inibição competitiva pelo produto.

$$v = \frac{V_{\text{máx}} \cdot S}{K_m \left(1 + \frac{P}{K_{ic}}\right) + S} \quad (1)$$

Outro modelo cinético avaliado foi o de Michaelis-Menten Modificado com inibição competitiva pelo produto (MI_{mod}) (Equação 2), em que a velocidade inicial de hidrólise é função das concentrações iniciais de enzima Ce_0 . Neste modelo, $V_{\text{emáx}}$ é a velocidade máxima para a concentração inicial de sítios de adsorção no substrato ($k \cdot S_0$), K_e é a constante de meia-saturação, e K_{ic} é a constante de inibição competitiva pelo produto. Quanto menor o valor de K_{ic} , maior se torna o valor do denominador e, portanto, maiores são os efeitos inibitórios indicados pelo modelo.

$$v = \frac{V_{\text{emáx}} \cdot Ce_0}{K_e \left(1 + \frac{P}{K_{ic}}\right) + Ce_0} \quad (2)$$

Um terceiro modelo utilizado foi o de Chrastil. Neste, P indica a concentração de produtos que se difundem no tempo, P_{∞} é a concentração de produtos que se difundem no equilíbrio, k' é a constante de velocidade proporcional ao coeficiente de difusão definido

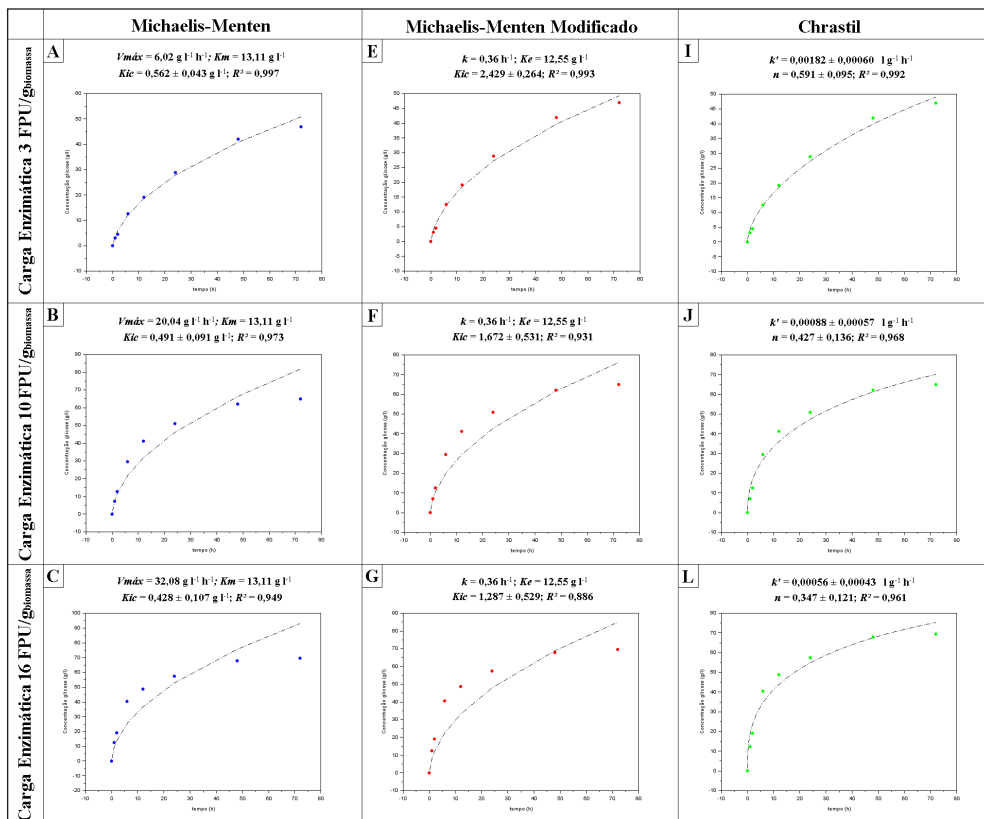
pela Lei de Fick, e n é a constante estrutural de resistência difusional, que quanto menor e mais distante de 1, indicará a presença de maiores resistências difusivas no sistema.

$$P = P_{\infty} [1 - \exp(-k' * Ce0 * t)]^n \quad (3)$$

A estimativa de parâmetros foi feita no software *EMSO*[®], um ambiente para modelagem, simulação e otimização primariamente voltado às equações. A obtenção dos parâmetros de inibição K_{ic} de MI e MI_{mod} e k' e n da Equação de Chrastil se deu através da aplicação do algoritmo IPOPT, ou *Interior Point Optimizer*. Os parâmetros $V_{m\acute{a}x}$ e K_m do modelo de MI e k e K_e do modelo de MI_{Mod} foram obtidos em trabalho que empregou o método das velocidades iniciais em condições experimentais semelhantes (Pratto *et al.*, 2016).

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais para a cinética de hidrólise enzimática (pontos) e os resultados simulados através dos modelos cinéticos (curvas tracejadas) estão representados na Figura 1 para as diferentes cargas enzimáticas avaliadas.



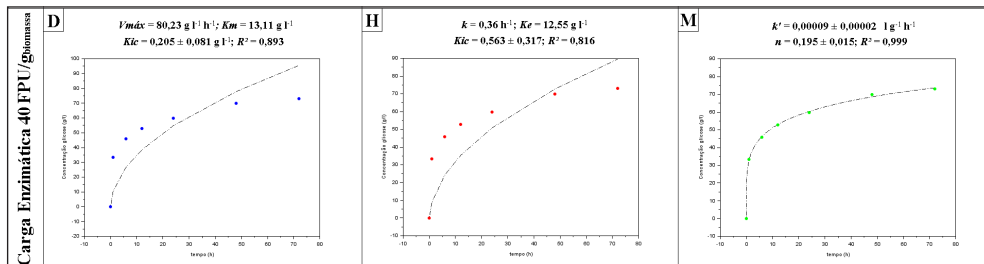


Figura 1 – Resultados simulados (curvas tracejadas) e experimentais (pontos) para os experimentos de hidrólise com cargas enzimáticas respectivas de 3, 10, 16 e 40 FPU/g ^{biomassa}. Figuras A, B, C e D para o modelo de MI; figuras E, F, G e H para o modelo de MI_{mod}; e figuras I, J, L e M para modelo de Chrastil. O nível de confiança estatística para os parâmetros K_{ic} , k' e n é de 95%.

Diferentemente do modelo de Chrastil, os modelos de MI e MI_{Mod} não tiveram boa aderência ($R^2 < 0,9$) aos dados experimentais obtidos com ensaios envolvendo cargas enzimáticas mais elevadas. Deve-se ressaltar que uma das hipóteses adotadas para a dedução do modelo de Michaelis-Menten é a de que a concentração de substrato é altamente superior à concentração das enzimas. Ademais, os valores de K_{ic} apresentam queda expressiva com o aumento da carga enzimática adicionada inicialmente à hidrólise de acordo com os modelos de MI e MI_{mod}, indicando a presença de efeitos inibitórios significativos. Pode-se afirmar que a adição de maiores quantidades de *Cellic® CTec-2* ao início elevou as probabilidades de se ocorrerem ligações entre a glicose (que no caso seria o inibidor) e a enzima. Isso diminuiu a quantidade de sítios ativos disponíveis para a formação do complexo enzima-substrato ao longo do tempo de hidrólise.

O modelo de Chrastil apresentou alta aderência aos dados experimentais, superior aos modelos de MI e MI_{mod}, sendo o mais recomendado entre os modelos avaliados para aplicações futuras de simulação e análise. Tal modelo também pode ser utilizado para se analisar o efeito inibitório da glicose na hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar. Há uma tendência de diminuição dos valores do parâmetro n com a adição de maiores *Ce0*. Altas velocidades de hidrólise enzimática foram obtidas para os tempos iniciais de análise. Todavia, a formação de teores de glicose facilitou a formação de ligações não-produtivas. A queda na taxa de hidrólise observada para $Ce0 = 40$ FPU/g ^{biomassa} entre 2 e 12 h, por exemplo, apresenta evidências para um excesso de ligações não-produtivas em maiores tempos de reação, e este ocorreu especialmente nos casos de maior concentração inicial do coquetel enzimático. Reduziu-se a quantidade de enzimas biodisponíveis para ligações efetivas e também se gerou limitações advindas do aumento da resistência à difusão interna.

É notável a indicação de elevada resistência difusiva estrutural em todos os casos avaliados. Esta última está diretamente ligada à queda do parâmetro k' da Equação de

Chrastil e à redução do rendimento da hidrólise (Carvalho *et al.*, 2013). Isso indica que o pré-tratamento hidrotérmico, bastante efetivo na emissão de hemicelulose, não foi capaz de expor toda a celulose ao ataque enzimático, caracterizando a palha de cana-de-açúcar como uma biomassa recalcitrante, isto é, que é resistente à grandes variações na sua estrutura ainda que depois de pré-tratamento com elevado grau de severidade (Batista *et al.*, 2019).

Este trabalho assimila informações da cinética de hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração, uma tecnologia em desenvolvimento e cuja utilização é ainda incipiente. A utilização de modelos cinéticos semi-mecanísticos simples obteve bons resultados para a modelagem da hidrólise enzimática nas condições avaliadas, sobretudo considerando que na literatura há modelos relativamente mais complexos que possuem a mesma finalidade (Angarita *et al.*, 2015). Resultados obtidos neste estudo poderão ser empregados em projetos de pesquisa e desenvolvimento, análise econômica, *scale-up*, entre outros, uma vez que o custo do coquetel enzimático é ainda um dos principais entraves para a produção do etanol celulósico (Longati *et al.*, 2018).

4 | CONCLUSÕES

O modelo de Chrastil ajustou-se satisfatoriamente a todos os casos analisados neste trabalho. Por outro lado, os modelos de MI e MI_{Mod} apresentaram menor aderência aos dados experimentais quando se utilizaram altas cargas enzimáticas iniciais. A inibição pelo produto da hidrólise enzimática (glicose) causou queda nos valores dos parâmetros K_{ic} , k' e n para maiores valores de $Ce0$. Isso se deve ao aumento no número de ligações não-produtivas entre inibidor e enzima e também ao conseqüente aumento da resistência à difusão interna ao longo do tempo. Os resultados indicam que a carga enzimática para a hidrólise da palha de cana-de-açúcar é uma variável de processo a ser otimizada em estudos futuros, uma vez que o aumento da concentração das enzimas presentes no meio não representa necessariamente o aumento proporcional da quantidade de glicose a ser obtida para posterior fermentação em E2G.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processo 140761/2017-9) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

ANGARITA, J.D., SOUZA, R.B.A., CRUZ, A.J.G., BISCAIA, E.C., Secchi, A.R. **Kinetic modeling for enzymatic hydrolysis of pretreated sugarcane straw**. *Biochemical Engineering Journal*, v. 104, p. 10-19, 2015.

BATISTA, G., SOUZA, R.B.A., PRATTO, B., SANTOS-ROCHA, M.S.R., CRUZ, A.J.G. E **Effect of severity factor on the hydrothermal pretreatment of sugarcane straw**. *Bioresource Technology*, v. 275, p. 321–327. 2019.

CARVALHO, M.L., SOUSA JR., R., RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U.F., SUAREZ, C.A.G., RODRIGUES, D.S., GIORDANO, R.C., GIORDANO, R.L.C. **Kinetic Study of the Enzymatic Hydrolysis of Sugarcane Bagasse**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 30, nº 03, p. 437-447, 2013.

FURLAN, F. F. GIORDANO, R. C. COSTA, B. B. C. SECCHI, A. R. WOODLEY, J. M. **Process alternatives for second generation ethanol production from sugarcane bagasse**. *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Copenhagen, Dinamarca. Elsevier. 2015.

GHOSE, T.K. **Measurement of Cellulase Activity**. *Pure and Applied Chemistry*, v. 59, p. 257–268, 1987.

PRATTO, B., SOUZA, R.B.A., SOUSA JR., R., CRUZ, A.J.G. **Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Sugarcane Straw: Kinetic Study and Semi-Mechanistic Modeling**. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 178, nº 7, p. 1430-44, 2016.

GOUVEIA, E.R., NASCIMENTO, R.T., SOUTO-MAIOR, A.M., **Validation of methodology for the chemical characterization of sugarcane bagasse**. *Química Nova*, v. 32, p. 1500–1503. 2009.

LEAL, M.R.L.V., GALDOS, M.V., SCAPARE, F.V., SEABRA, J.E.A., WALTER, A., OLIVEIRA, C.O.F. **Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review**. *Biomass and Bioenergy*, v. 53, p. 11–19. 2013.

LONGATI, A.A., LINO, A.R.A., GIORDANO, R.C., FURLAN, F. F., CRUZ, A.J.G. **Defining research & development process targets through retro-techno-economic analysis: The sugarcane biorefinery case**. *Bioresource Technology*, v. 263, p. 1-9, 2018.

ROCHA, G.J.M., SILVA, F.T., ARAÚJO, G.T., CURVELO, A.A.S. **A Fast and Accurate Method for Determination of Cellulose and Polyoses by HPLC**. *5th Brazilian Symposium on the Chemistry of Lignins and Other Wood Components*, 1997.

SOUZA, R.B.A. **Estudo do Pré-Tratamento Hidrotérmico e Hidrólise Enzimática da Palha de Cana-De-Açúcar**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

UNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar**. São Paulo, Brasil. <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Acesso em 21 de outubro de 2020. 2020.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Absorbância 72, 73, 205, 212, 214

Adsorção 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 121, 127, 184, 186, 189, 190, 191, 192, 196, 201, 204, 205

Adsorvente 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 71, 72, 74, 79, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 191

Águas superficiais 208, 209

Ambiente aquático 132, 185, 194

Analito 59, 60, 61, 62, 64, 65

B

Bactérias 128, 130, 136, 142, 146, 209

Bioadsorventes 58, 184, 218

Biocombustíveis 83, 158

Biodegradável 107, 158

Biodiesel 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 173

Biogás 179

Biomassa 59, 65, 82, 83, 84, 86, 87, 92, 119, 120, 121, 123, 124, 128, 160

C

Carbono 7, 13, 16, 21, 30, 40, 54, 83, 210, 212

Celulose 59, 60, 66, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 89, 90, 105, 116, 119, 120, 121, 124, 189

Coagulante 108, 117

Coliformes 116, 141, 142, 143, 145, 146

Condensador 148, 149, 150, 152, 153

Contaminação 26, 69, 215

Contaminantes emergentes 56, 185

Copolímero 13, 14, 20, 38

D

Degradação 65, 85, 127, 182, 194, 195, 197, 201, 202, 203, 204, 205, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215, 216

Densidade 11, 29, 58, 107, 108, 112, 113

Desenvolvimento sustentável 2, 11

Dessorção 196, 201

Destilação 152

Diesel 157, 158, 160, 169, 170, 172, 173, 175, 176, 177, 179

Dióxido de titânio (TiO₂) 210

E

Ecosistema 129, 130

Espectroscopia 54, 61, 83, 86, 90, 184, 196

Estação de tratamento de esgoto (ETE) 65, 218

Estrutura amorfa 82, 83

F

Fármacos 64, 184, 185, 186, 194, 208

Fibras 60, 83, 86, 87, 96

Floculante 105, 106, 107, 110

Fluido 55, 148, 149, 150, 167

Fotoatividade 195, 213

Fotocatalisador 194, 203, 204, 210, 213

Fotocatálise heterogênea 194, 210

G

Granulometria 3, 4, 63, 84, 120, 190, 208, 212, 213, 216

H

Hidrofílico 21, 58

I

Indústria química 148

In natura 14, 59, 61, 64, 65, 67, 69, 71, 73, 74, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 92, 120, 187, 188

L

Lignina 60, 61, 66, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 119, 120

M

Mananciais 2, 208

Materiais lignocelulósicos 56, 59, 60, 61, 85, 120

Matéria-prima 2, 83

Matrizes ambientais 183

Meio ambiente 1, 2, 70, 80, 82, 87, 106, 116, 126, 128, 181, 184

Metais 2, 55, 56, 57, 58, 62, 63, 64, 69, 70, 127, 130, 138, 186, 210, 218

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 62, 184, 196, 211, 212

Mineral 70

Mineralização 212, 215

N

Nanomateriais 40

Nanopartículas 184, 186, 187, 188, 192, 194, 195, 197, 212, 213

O

Óleos 13, 14, 16, 17, 20, 22, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 37, 38, 39, 157, 158, 160, 161, 162, 164, 169

Otimização 20, 54, 56, 58, 62, 63, 84, 105, 106, 122, 153, 165, 166, 168, 170

Oxidação 54, 63, 70, 127, 160, 194, 204, 215

P

Patógenos 127, 141, 209

Polímero 14, 60, 96, 106, 107, 112, 119

Polissacarídeos 61

Pré-tratamento 58, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 119, 120, 124, 125, 180, 182, 183, 210

Processos industriais 70, 82, 83

Processos oxidativos avançados 57, 194, 195, 208, 209, 210, 218

R

Radiação 61, 132, 195, 196, 200, 210, 216, 218

Reaproveitamento 1, 3, 12, 56, 126, 136, 138

Recursos hídricos 69, 127, 128

Remediação ambiental 56, 58, 218

Remoção 57, 59, 64, 65, 67, 69, 70, 73, 74, 78, 79, 82, 84, 87, 88, 105, 110, 113, 114, 115, 116, 127, 128, 130, 131, 139, 163, 182, 183, 184, 185, 186, 190, 191, 192, 201, 216, 218

Renovável 82, 83, 158, 160, 161

Resíduo 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 67, 81, 82

Resistência 1, 2, 7, 9, 10, 11, 14, 25, 58, 82, 118, 119, 122, 123, 124, 208

S

Semicondutor 213

Superfície 21, 61, 78, 79, 84, 110, 115, 130, 131, 132, 133, 143, 149, 186, 187, 188, 190,

196, 197, 204, 205, 211

T

Temperatura 1, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 17, 31, 63, 84, 95, 96, 98, 111, 112, 119, 120, 127, 136, 143, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 159, 161, 164, 166, 168, 182, 183, 187, 188, 189, 196, 197

Toxicidade 70, 194, 195, 209

Tratamento de efluentes 56, 57, 58, 65, 105, 126, 139, 208

Trocador de calor 148, 149, 152, 153, 154

Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

Atena
Editora

Ano 2021

Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia na Engenharia Química 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

Atena
Editora

Ano 2021