



# Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3

---

Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

# Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

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

**Diagramação e Edição de Arte:** Natália Sandrini e Lorena Prestes

**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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
134	Impactos das tecnologias na engenharia química 3 [recurso eletrônico] / Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Química; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-231-9 DOI 10.22533/at.ed.319190104  1. Engenharia química – Pesquisa – Brasil. I. Voigt, Carmen Lúcia. II. Série.  CDD 660.76
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

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

O acentuado crescimento da população mundial, bem como a ânsia de melhor nível de vida, têm criado elevadas pressões sobre os recursos naturais, matérias-primas, o solo, a água, o ar e os ecossistemas em geral. A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos urbanos, tornando-se um grave problema para as administrações públicas.

A indústria química tem contribuído para a geração de efluentes líquidos e gasosos contendo substâncias tóxicas, bem como de resíduos sólidos perigosos que, lançados diretamente ou indiretamente sem qualquer tratamento no meio ambiente, podem provocar grandes desequilíbrios ecológicos. O uso intensivo de produtos químicos, se por um lado trouxe elevados benefícios aos padrões de vida, por outro lado, os níveis de poluição que estão associados à sua produção são por vezes muito elevados.

As novas tecnologias na Engenharia Química auxiliam nos processos de recuperação e reutilização de resíduos, assim como conversão em novas fontes de energia. Além das diversas formas de obtenção de energia renovável já existente, cada vez mais vem surgindo uma maior procura por outras formas de energia não poluentes. Essas razões são as mais motivacionais: a ideia de uma possível escassez de recursos fósseis, a tentativa de reduzir as emissões de gases nocivos para a atmosfera e que causam o efeito estufa, e, além disso, almeja se alcançar certa independência em relação petróleo.

As questões energéticas são extremamente importantes para a sustentabilidade das sociedades modernas, uma vez que a sobrevivência humana depende do fornecimento contínuo de energia. Esse cenário faz com que seja preciso realizar buscas por alternativas energéticas que sustentem a necessidade humana e que não prejudiquem o ambiente.

Para empresas, além da questão ambiental, um excessivo gasto de energia (advinda de recursos não renováveis) é sinônimo de prejuízo. Eis então uma grande oportunidade para engenheiros químicos intervirem na melhoria da eficiência energética dos processos, ajudar a desenvolver tecnologias limpas e promover a utilização de energias alternativas nas indústrias. Com isso, ocorrerá uma redução de custos e será uma contribuição válida ao meio ambiente o que hoje em dia vem gerando maior competitividade para as empresas. O uso de resíduos agrícolas como fonte de bioenergia tem despertado crescente interesse no setor de agroenergia.

Neste terceiro volume, apresentamos trabalhos com impactos tecnológicos relacionados à indústria, focando na reutilização de produtos e conversão em energia renovável, bem como avanço nos processos para redução da poluição atmosférica e em efluentes. Com isso, convidamos você a aperfeiçoar seus conhecimentos da Engenharia Química voltada para a área ambiental trazendo benefícios para toda a sociedade.

Boa leitura.

Carmen Lúcia Voigt

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES CONTENDO METAIS PESADOS	
Kaíque Souza Gonçalves Cordeiro Oliveira	
Pedro Henrique Trindade Dias Cabral	
Roberta Resende Maciel da Silva	
Carla Torres Dias	
José Renato Guimarães	
Ana Paula Fonseca Maia de Urzedo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901041</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
RESÍDUOS DE CANA-DE-AÇÚCAR E MILHO COMO MATÉRIA PRIMA DO ETANOL 2G: ATUALIDADES E PERSPECTIVAS	
Caroline Müller	
Letícia Mara Milani	
Anderson Giehl	
Évelyn Taize Barrilli	
Letícia Deoti	
Ana Carolina Lucaroni	
Viviani Tadioto	
Helen Treichel	
Sérgio Luiz Alves Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901042</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE BIOSURFACTANTE A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS EM BIORREATOR EM BATELADA ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS CINÉTICOS POR ALGORITMO GENÉTICO	
Júlia do Nascimento Pereira Nogueira	
Ana Luiza Bandeira de Mello de Albuquerque Campos	
Brunno Ferreira dos Santos	
Filipe Alves Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901043</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>29</b>
VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA A PRODUÇÃO DO FUNGO ENTOMOPATOGÊNICO <i>METARHIZIUM ANISOPLIAE</i> POR PROCESSOS DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO	
Eloane Daize Gomes Dallastra	
Enylson Xavier Ramalho	
Lina María Grajales Agudelo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901044</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>40</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM COSMÉTICO A PARTIR DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL	
Ana Paula Olivo	
Kátya Regina de Freitas Zara	
Leonardo da Silva Arrieche	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901045</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>51</b>
INFLUÊNCIA DA GORDURA RESIDUAL DE UNIDADES INDUSTRIAIS DE AVES NA FABRICAÇÃO DE BASE PARA CREME HIDRATANTE	
Jacqueline Hahn Bernardi Cristina Helena Bruno Andreia Cristina Furtado Leonardo da Silva Arrieche	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901046</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>58</b>
ANÁLISE DA COMPRESSÃO AXIAL E ABSORÇÃO DE ÁGUA EM CONCRETO PRODUZIDO COM CAROÇO RESIDUAL DE AZEITONA	
Manoela Silva Lima Mariotini Carotta Alan Carlos de Almeida Ana Paula de Carvalho Faria Luiz Felipe Lima Panizzi Jonas dos Santos Pacheco Cristiane de Souza Siqueira Pereira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901047</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>63</b>
INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO NA FIBRA DE COCO PARA UTILIZAÇÃO EM COMPÓSITO POLIMÉRICO	
Wenderson Gomes dos Santos Gilmar Alves Borges Lauro Henrique Hamoy Guerreiro Dilson Nazareno Pereira Cardoso Douglas Alberto Rocha de Castro Emerson Cardoso Rodrigues	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901048</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>68</b>
INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS ORGANOSOLV E HIDROTÉRMICO APLICADOS AO BAGAÇO DE CANA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM PEAD	
Bruno Chaboli Gambarato Tatiana Raposo de Paiva Cury Sérgio Teodoro de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3191901049</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>74</b>
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADOS COM BAGAÇO DE CANA	
Bruno Chaboli Gambarato Gilson Carlos Rodrigues Paulino Amanda Santos Leopoldino Lucas Bruno de Paiva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010410</b>	

**CAPÍTULO 11 ..... 79**

**BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA INTEGRADO DE BIO-COMBUSTÃO**

Ihana Aguiar Severo  
Yuri Naidon Favero  
Mariany Costa Deprá  
Rodrigo Stefanello Bizello Barrios  
Rosangela Rodrigues Dias  
Mariane Bittencourt Fagundes  
Roger Wager  
Leila Queiroz Zepka  
Eduardo Jacob-Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.31919010411**

**CAPÍTULO 12 ..... 85**

**CARACTERIZAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SORGO BIOMASSA PARA BIOENERGIA**

Maria Lúcia Ferreira Simeone  
Patrícia Abraão de Oliveira  
Kirley Marques Canuto  
Rafael Augusto da Costa Parrella  
Cynthia Maria Borges Damasceno  
Robert Eugene Schaffert

**DOI 10.22533/at.ed.31919010412**

**CAPÍTULO 13 ..... 90**

**DESENVOLVIMENTO DE BIODIGESTOR E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO PARA TRATAMENTO DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO**

Flávia Souza Pio  
Letícia Tamara Santana  
Lorena Kelly Corrêia  
Francine Duarte Castro

**DOI 10.22533/at.ed.31919010413**

**CAPÍTULO 14 ..... 97**

**RESOLUÇÃO DE PROBLEMA DE VALOR NO CONTORNO ASSOCIADO À MODELAGEM DE BIORREATORES TUBULARES DE FLUXO DISPERSO E CINÉTICA DE MICHAELIS-MENTEN LINEARIZADA**

Samuel Conceição Oliveira  
Felipe Coelho Morilla

**DOI 10.22533/at.ed.31919010414**

**CAPÍTULO 15 ..... 104**

**SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CICLOS A VAPOR PARA COGERAÇÃO DE BIOENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO**

Welban Ricardo Ursino  
Samuel Conceição Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.31919010415**

**CAPÍTULO 16 ..... 114**

AVALIAÇÃO DE ÓLEOS DE SOJA COM DIFERENTES ORIGENS NA PRODUÇÃO DO BIODIESEL VIA ROTA METÁLICA

Melissa Rafaela Wolf  
Isabela Silveira Tobias Perassi  
Nadine de Assis  
Fulvy Antonella Venturi Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.31919010416**

**CAPÍTULO 17 ..... 123**

PRODUÇÃO DE BIODIESEL PELA TRANSESTERIFICAÇÃO SUPERCRÍTICA ETANÓLICA: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Erich Potrich  
Bruno Elias Suzart Chamas  
Antonio José Gonçalves da Cruz  
Roberto de Campos Giordano

**DOI 10.22533/at.ed.31919010417**

**CAPÍTULO 18 ..... 129**

PRODUÇÃO DE BIOETANOL UTILIZANDO CÉLULAS DE SACCHAROMYCES CEREVISIAE IMOBILIZADAS EM ESFERAS DE ALGINATO DE CÁLCIO REVESTIDAS COM QUITOSANA

Lucidio Cristovão Fardelone  
Taciani do Santos Bella de Jesus  
Leonardo Akira Kamimura Oura  
Gustavo Paim Valença  
José Roberto Nunhez  
José Augusto Rosário Rodrigues  
Paulo José Samenho Moran

**DOI 10.22533/at.ed.31919010418**

**CAPÍTULO 19 ..... 137**

AUTOMAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM SENSORES E ATUADORES APLICADOS NA PLANTA DE TRATAMENTO DA PRODUÇÃO DO BIODIESEL

Thalys de Freitas Fernandes  
Dinilton Pessoa de Albuquerque Neto  
Gerônimo Barbosa Alexandre  
José Nilton Silva

**DOI 10.22533/at.ed.31919010419**

**CAPÍTULO 20 ..... 157**

ESTUDO CINÉTICO DA REAÇÃO DE FENTON COM PÓ DE MINÉRIO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE LAVAGEM DE BIODIESEL E AVALIAÇÃO DA LIXIVIABILIDADE DO RESÍDUO

Jamyla Soares Anício Oliveira Félix  
Aline Givisiez de Souza  
Francine Duarte Castro

**DOI 10.22533/at.ed.31919010420**

**CAPÍTULO 21 ..... 173**

APLICAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO CALCINADO NA REMOÇÃO DE ÓLEO DIESEL

Leonardo Henrique de Oliveira  
Selene Maria Arruda Guelli Ulson de Souza  
Antônio Augusto Ulson de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.31919010421**

<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>178</b>
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA DE POLARIZAÇÃO DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL TIPO PEM	
Roque Machado de Senna Thais Santos Henrique Senna Marcelo Linardi	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010422</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>187</b>
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA INDIVIDUAL DE COLETA E GLOBAL NA SEPARAÇÃO DE PARTICULADOS DE MAGNESITA EM CICLONE LAPPLE	
Polyana Gomes de Aguiar Daiane Ribeiro Dias Annanda Alkmim Alves Mariana Oliveira Marques João Carlos Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010423</b>	
<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>194</b>
ANÁLISE DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAH) NO AR ATMOSFÉRICO USANDO SISTEMA PASSIVO DE AMOSTRAGEM PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL	
Aldo Muro Júnior Nicola Pittet Muro Nelson Roberto Antoniosi Filho Maria Isabel Ribeiro Alves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010424</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>213</b>
CAPTURA DE CO <sub>2</sub> UTILIZANDO O PROCESSO CALCIUM-LOOPING	
Juliana Alves da Silva Ricardo José Chimentão João Batista Oliveira dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010425</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>224</b>
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO QUÍMICO DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> UTILIZANDO A TECNOLOGIA HIGEE NA INTENSIFICAÇÃO DE PROCESSOS PRODUTIVOS	
Kaíque Souza Gonçalves Cordeiro Oliveira José Renato Guimarães Brenda Sedlmaier Costa Coelho Camila Ceravolo de Carvalho Francine Silveira Vieira Luiza Moreira Santos Jorge David Alguiar Bellido	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010426</b>	

**CAPÍTULO 27 ..... 232**

Zn-ZIF EM TECIDO APLICADO NO PROCESSO DE CAPTURA DE CH<sub>4</sub>

Guilherme Andreoli Gil  
Guilherme Otávio Lima  
Lucas Mendes Pedro  
Bianca Bastos Caruzi  
Fabrício Maestá Bezerra  
Murilo Pereira Moisés

**DOI 10.22533/at.ed.31919010427**

**CAPÍTULO 28 ..... 239**

INIBIDOR DE CORROÇÃO OBTIDO POR LIXIVIAÇÃO DE CIGARRO APÓS SEU CONSUMO

Lauren Marcilene Maciel Machado  
Luciana Rodrigues Machado

**DOI 10.22533/at.ed.31919010428**

**CAPÍTULO 29 ..... 249**

ENRIQUECIMENTO DE BACTÉRIAS REDUTORAS DE SULFATO AUTÓCTONES E SUA ADESÃO EM ESPUMA DE POLIURETANO EM REATOR ANAERÓBIO NO TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

Alessandra Giordani  
Renata Piacentini Rodriguez  
Leonardo Henrique Soares Damasceno  
Gunther Brucha

**DOI 10.22533/at.ed.31919010429**

**CAPÍTULO 30 ..... 255**

BIODEGRADAÇÃO DO SURFACTANTE LINEAR ALQUILBENZENO SULFONATO DE SÓDIO EM DOIS DETERGENTES LIQUIDOS COMERCIAIS UTILIZANDO FUNGO FILAMENTOSO *Penicillium crustosum*

Sulamita Aparecida Ambrosia dos santos  
Luiza Maria Amaral Frossard de Paula  
Mayara Costa Franco  
Karen Sartori Jeunon Gontijo  
Ana Maria de Oliveira  
Enio Nazaré de Oliveira Junior

**DOI 10.22533/at.ed.31919010430**

**CAPÍTULO 31 ..... 272**

DEGRADAÇÃO DE CORANTES ALIMENTÍCIOS UTILIZANDO LAFeO<sub>3</sub> COMO CATALISADOR EM REAÇÃO FOTO-FENTON SOLAR

Patrícia Grassi  
Fernanda Caroline Drumm  
Siara Silvestri  
Sérgio Luiz Jahn  
Edson Luiz Foletto

**DOI 10.22533/at.ed.31919010431**

<b>CAPÍTULO 32</b> .....	<b>281</b>
DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DE RODAMINA B COM UM CATALISADOR À BASE DA BIOMASSA PORONGO: EFEITO DA DOPAGEM COM FERRO	
William Leonardo da Silva	
Mariéle Schaedler Nascimento	
Matheus Severo Schalenberger	
Joana Bratz Lourenço	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010432</b>	
<b>CAPÍTULO 33</b> .....	<b>287</b>
AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA, UTILIZANDO $\text{TiO}_2$ E ZNO, DO ANTIBIÓTICO METRONIDAZOL (MTZ) A PARTIR DA ESPECTROFOTOMETRIA	
Luiza Barbosa Petersen Mendes	
Luciane Pimentel Costa Monteiro	
Leandro Vahia Pontual	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010433</b>	
<b>CAPÍTULO 34</b> .....	<b>303</b>
CARACTERIZAÇÃO DE CÁPSULAS DE CAFÉ PÓS CONSUMO VISANDO A RECICLAGEM NA INDÚSTRIA TÊXTIL	
Valquíria Aparecida dos Santos Ribeiro	
Priscilla Sayuri Nakazawa	
Ana Maria Ferrari	
Ana Claudia Ueda	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010434</b>	
<b>CAPÍTULO 35</b> .....	<b>315</b>
APPLICATION OF THE MARKOV CHAIN MONTE CARLO METHOD TO ESTIMATION OF PARAMETERS IN A MODEL OF ADSORPTION-ENHANCED REACTION PROCESS FOR MERCURY REMOVAL FROM NATURAL GAS	
Josiel Lobato Ferreira	
Diego Cardoso Estumano	
Mariana de Mattos Vieira Mello Souza	
Emanuel Negrão Macêdo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010435</b>	
<b>CAPÍTULO 36</b> .....	<b>322</b>
SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CATALISADORES BASEADOS EM ÓXIDO DE FERRO SUPOSTADOS EM CARVÃO ATIVADO DERIVADO DA CASCA DO COCO VERDE	
Natália Matos Silva Pereira	
Marta Cecilia da Esperança Santos	
Sirlene Barbosa Lima	
Maria Luiza Andrade da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.31919010436</b>	
<b>SOBRE A ORGANIZADORA</b> .....	<b>334</b>

## RESOLUÇÃO DE PROBLEMA DE VALOR NO CONTORNO ASSOCIADO À MODELAGEM DE BIORREATORES TUBULARES DE FLUXO DISPERSO E CINÉTICA DE MICHAELIS-MENTEN LINEARIZADA

### Samuel Conceição Oliveira

UNESP – Universidade Estadual Paulista, FCF –  
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, PPG-EBB  
– Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Biomateriais e Bioprocessos.  
Araraquara – SP.

### Felipe Coelho Morilla

UNESP – Universidade Estadual Paulista, IGCE  
– Instituto de Geociências e Ciências Exatas, DF  
– Departamento de Física.  
Rio Claro – SP.

**RESUMO:** Neste capítulo, são apresentados resultados da aplicação de um método numérico para resolução de problemas de valor no contorno associados ao projeto de biorreatores de fluxo disperso empregados no tratamento biológico de efluentes. Quando o comportamento hidrodinâmico desses biorreatores é descrito por um modelo de dispersão axial e a cinética de reação por modelos não lineares, a equação diferencial que representa o balanço de massa do poluente no biorreator somente pode ser resolvida por meio de métodos numéricos complexos, incluindo o *shooting method*. Esse método foi usado neste estudo para resolver o problema referente à versão linearizada de 1ª ordem da cinética de Michaelis-Menten, para a qual existe solução analítica do problema, o que permitiu comparar os resultados fornecidos

por ambas as soluções. Os resultados obtidos revelaram uma estreita concordância entre as soluções numérica e analítica, recomendando o uso do método apresentado para a resolução de problemas similares envolvendo outras cinéticas de reação.

**PALAVRAS-CHAVE:** problema de valor no contorno, tratamento biológico de efluentes, biorreatores de fluxo disperso, cinética de Michaelis-Menten

**ABSTRACT:** In this chapter, results of the application of a numerical method for solving boundary value problems associated with the design of dispersed flow bioreactors used in the biological treatment of effluents are reported. When the hydrodynamic behavior of these bioreactors is described by an axial dispersion model and the reaction kinetics by nonlinear models, the differential equation representing the mass balance of the pollutant in the bioreactor can only be solved by complex numerical methods, including shooting method. This method was used in this study to solve the problem of the linearized first-order version of Michaelis-Menten kinetics, for which there is an analytical solution of the problem, which allowed to compare the results provided by both solutions. The results showed a close agreement between the numerical and analytical solutions, recommending the use of the presented method

to solve similar problems involving other reaction kinetics.

**KEYWORDS:** boundary value problem, wastewater biological treatment, dispersed flow bioreactors, Michaelis-Menten kinetics

## 1 | INTRODUÇÃO

Para o dimensionamento do volume do reator requerido para se atingir determinada eficiência durante o tratamento biológico de efluentes é necessário o conhecimento do comportamento hidrodinâmico do reator bem como da cinética de decomposição do poluente (OLIVEIRA; MORILLA, 2016).

Um modelo utilizado para descrever o comportamento hidrodinâmico de biorreatores nos quais ocorre alguma mistura do meio reacional durante sua passagem pelo reator é o modelo de  $N$  reatores de mistura completa em série, o qual representa condições hidrodinâmicas intermediárias entre o reator de mistura completa e o de fluxo pistonado (VON SPERLING, 1996; METCALF; EDDY, 2003).

Outro modelo é o de fluxo disperso, o qual incorpora um parâmetro de dispersão que caracteriza o grau de mistura dos elementos de fluido no interior do reator, sendo um dos modelos apropriados para projetos mais precisos de biorreatores de tratamento de efluentes (VON SPERLING, 1996; METCALF; EDDY, 2003; LEVENSPIEL, 1999).

Uma equação que tem sido usada para descrever a taxa de reação é aquela de Michaelis-Menten, a qual é oriunda da cinética enzimática. A decomposição do poluente durante o tratamento biológico envolve uma série de reações no interior das células que são catalisadas por enzimas (VON SPERLING, 1996) e admite-se que uma dessas reações seja a etapa limitante da velocidade do processo global de degradação. Dependendo dos valores relativos da concentração do substrato poluente ( $C$ ) e do parâmetro  $K_s$  na equação de Michaelis-Menten, essa pode ser linearizada a uma cinética de ordem zero ou a uma cinética de 1ª ordem.

Quando o modelo hidrodinâmico do reator é de fluxo disperso e a cinética de reação é não linear, tal como a cinética de Michaelis-Menten, a equação diferencial que descreve o balanço de massa do poluente somente pode ser resolvida por meio de métodos numéricos complexos uma vez que o problema é de valor no contorno.

Dentre os métodos numéricos empregados para a resolução de problemas de valor no contorno destaca-se o *shooting method* (método do disparo), o qual consiste em reduzir a solução do problema de valor no contorno original à solução de um problema de valor inicial pelo “disparo” de trajetórias em diferentes direções até que seja encontrada uma trajetória que leve ao valor final especificado. Isto é, o problema de valor no contorno é inicialmente convertido em um problema de valor inicial pela especificação de todas as condições de contorno no ponto inicial. Em seguida, o problema resultante é então resolvido por tentativa e erro, assumindo-se inúmeras estimativas iniciais para a condição de contorno inicial desconhecida até que a condição de contorno final seja satisfeita. Assim, a resolução do problema consiste em

encontrar um método eficiente para determinar o valor da condição de contorno inicial que satisfaça o problema (RAMIREZ, 1989).

Em um estudo anterior, Oliveira e Morilla (2016) utilizaram o *shooting method* para resolver o problema referente à cinética do tipo lei de potência de 2ª ordem (cinética não linear) e compararam os resultados obtidos com a solução gráfica disponível na literatura.

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados da resolução do problema de valor no contorno para a cinética de Michaelis-Menten em sua forma linearizada de 1ª ordem. Essa particular forma de equação é de interesse porque a cinética de 1ª ordem tem sido usada como uma primeira aproximação para descrever o decaimento não linear da concentração de poluentes em diversos biosistemas. Além disso, para essa cinética, existe solução analítica para o problema, o que permite uma comparação rigorosa entre as soluções numérica e analítica.

## 2 | MODELOS MATEMÁTICOS E MÉTODOS NUMÉRICOS

### 2.1 Cinética de Michaelis-Menten

A equação de Michaelis-Menten é o modelo precursor da cinética enzimática a partir do qual outros modelos cinéticos, incorporando efeitos de inibição por substrato, produto e outros inibidores, foram concebidos, sendo representada por:

$$r = r_{max} \left( \frac{C}{K_S + C} \right) \quad (1)$$

Na Equação (1),  $r$ ,  $r_{max}$ ,  $K_S$  e  $C$  possuem os seguintes significados segundo Von Sperling (1996):  $r$  = taxa de reação ;  $r_{max}$  = taxa máxima de reação que no caso de tratamento biológico é uma função da concentração de biomassa no reator ;  $K_S$  = constante de saturação ;  $C$  = concentração do substrato poluente.

A Equação (1) pode ser linearizada a formas mais simplificadas de acordo com os valores relativos de  $C$  e  $K_S$ , como segue:

- $C \gg K_S : r = r_{max}$  .....(cinética de ordem 0) (2)

- $C \ll K_S : r = \left( \frac{r_{max}}{K_S} \right) C$  .....(cinética de ordem 1) (3)

### 2.2 Modelo Matemático do Biorreator

O modelo matemático do biorreator corresponde ao balanço de massa do poluente considerando escoamento em fluxo disperso e cinética de reação dada pela

forma linearizada de 1ª ordem da equação de Michaelis-Menten, sendo representado pela seguinte equação adimensional:

$$d \frac{d^2 f}{dz^2} - \frac{df}{dz} - Rf = 0 \quad (4)$$

onde:  $d=D/(uL)$ ;  $f=C/C_0$ ;  $z=x/L$ ;  $R=kt_h$ ;  $k=r_{\max}/K_S$ ;  $t_h=L/u=V/Q$ .

Na Equação (4) tem-se que:  $d$ =número de dispersão,  $D$ =coeficiente de dispersão axial,  $u$ =velocidade média de escoamento do fluido,  $L$ =comprimento do biorreator,  $f$ =fração de poluente não degradada,  $C$ =concentração de poluente numa dada posição  $z$  do biorreator,  $C_0$ =concentração de poluente na alimentação,  $z$ =posição axial adimensional,  $x$ =posição axial,  $R$ =parâmetro reacional,  $k$ =constante cinética de 1ª ordem,  $t_h$ =tempo de detenção hidráulica,  $V$ =volume do biorreator,  $Q$ =vazão volumétrica de alimentação.

Para a resolução da Equação (4), foram adotadas as condições de contorno (CC) usadas por Wehner e Wilhelm (1956) ao obterem a solução analítica para o problema:

- CC1 )  $z = 0: f(0^-) = 1 = f(0^+) - d \frac{df(0^+)}{dz}$  (5)

- CC2 )  $z = 1: \frac{df(1)}{dz} = 0$  (6)

A CC1 representa a dispersão axial na entrada do biorreator enquanto que a CC2 estabelece a saída do biorreator como sendo o final do tratamento, não ocorrendo variações na concentração de poluente nem dispersão e reação a partir deste contorno.

## 2.3 Métodos Numéricos

Devido às condições de contorno serem dadas para dois valores distintos de  $z$ , o problema fica caracterizado como sendo um problema de valor no contorno, podendo ser resolvido por diferentes métodos, dentre os quais o *shooting method* (RAMIREZ, 1989; OLIVEIRA; MORILLA, 2016). A aplicação do *shooting method* à resolução do problema consistiu das etapas descritas a seguir.

Inicialmente, realizou-se a mudança de variável  $y=df/dz$  na Equação (4), transformando a EDO de 2ª ordem original em um sistema equivalente de duas EDOs de 1ª ordem, dado por:

$$\begin{cases} \frac{df}{dz} = y & (7) \\ \frac{dy}{dz} = \frac{1}{d}(y + Rf) & (8) \end{cases}$$

O sistema de EDOs foi então integrado numericamente desde  $z=0$  (entrada do reator) até  $z=1$  (saída do reator) utilizando-se o método de Runge-Kutta-Gill de 4ª ordem com passo de integração variável (RAMIREZ, 1989; BEQUETTE, 1998; CONSTANTINIDES; MOSTOUFI, 1999).

Como o valor de  $y(0)$  era desconhecido, atribuiu-se um valor inicial a  $f(0^+)$  na condição de contorno de entrada (CC1), calculando-se o valor de  $y(0)$  por essa condição. Conhecidos os valores de  $f$  e  $y$  em  $z=0$ , o sistema de EDOs era integrado e verificado se a condição de contorno na saída do reator (CC2) era satisfeita ou não. Em não sendo, o valor atribuído a  $f(0^+)$  era iterado e a integração refeita, repetindo-se todo o procedimento até que a condição de contorno na saída do reator fosse cumprida.

Para a iteração do valor de  $f(0^+)$  utilizou-se o método de Newton-Raphson (Constantinides e Mostoufi, 1999), determinando-se a raiz da seguinte equação algébrica não linear:

$$g(f(0^+)) = [y(1)]_{\text{calculado}} - [y(1)]_{\text{especificado}} = 0 \quad (9)$$

A derivada de  $g(f(0^+))$  com relação à  $f(0^+)$ , necessária no método de Newton-Raphson, foi calculada numericamente usando a fórmula de diferença finita à frente.

A solução analítica para esse problema avaliada na saída do reator ( $z=1$ ) é dada por (WEHNER; WILHELM, 1956; VON SPERLING, 1996):

$$f = \frac{4a \exp [1/(2d)]}{(1+a)^2 \exp [a/(2d)] - (1-a)^2 \exp [-a/(2d)]} ; a = \sqrt{(1+4kt_h d)} \quad (10)$$

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os valores de  $f$  obtidos via solução analítica e via solução numérica para valores de  $d$  e  $kt_h$  típicos para reações de 1ª ordem. Analisando-se os dados da Tabela 1, pode-se afirmar que o *shooting method*, em conjunto com o método de Newton-Raphson, mostrou-se eficaz para a resolução do problema de valor no contorno referente ao caso da cinética de Michaelis-Menten em sua versão linearizada de 1ª ordem, fornecendo valores de  $f$  na saída do reator praticamente iguais aos calculados pela solução analítica para todos os valores de  $d$  e  $kt_h$  utilizados.

Uma prática comum na área de tratamento de efluentes é apresentar a solução da Equação (4) na forma de curvas de eficiência ( $E$ ) versus  $kt_h$ , parametrizadas pelo número de dispersão  $d$ . A eficiência é definida como a porcentagem de degradação do poluente devido ao tratamento biológico do efluente, sendo dada por  $E=(1-f)\times 100\%$ . Na Figura 1 estão apresentadas curvas de eficiência de remoção de poluente em função de  $kt_h$  para diferentes números de dispersão. Comportamento característico para tais curvas pode ser observado, similar àquele reportado na literatura para a cinética de 1ª ordem (VON SPERLING, 1996).

$kt_h$	$d=0,5$		$d=1,0$		$d=2,0$	
	Solução Numérica	Solução Analítica	Solução Numérica	Solução Analítica	Solução Numérica	Solução Analítica
1,0	0,447398501	0,447398523	0,467655861	0,467655882	0,481772469	0,481772488
2,0	0,248551606	0,248551626	0,279387027	0,279387046	0,302114112	0,302114130
3,0	0,153723378	0,153723395	0,186411909	0,186411926	0,212115912	0,212115928
4,0	0,101564387	0,101564401	0,132637269	0,132637283	0,158710683	0,158710697
5,0	0,0702319831	0,0702319939	0,0984888855	0,0984888974	0,123738163	0,123738174
6,0	0,0502336170	0,0502336257	0,0754120907	0,0754121008	0,0993062537	0,0993062641
7,0	0,0368858811	0,0368858882	0,0591055522	0,0591055609	0,0814383638	0,0814383730
8,0	0,0276638442	0,0276638499	0,0471877124	0,0471877199	0,0679167804	0,0679167886
9,0	0,0211135959	0,0211136006	0,0382435508	0,0382435573	0,0570409440	0,0570409447
10,0	0,0163540813	0,0163540852	0,0313856837	0,0313856894	0,0490695681	0,0490695748

Tabela 1 – Fração de poluente ( $f$ ) na saída do biorreator calculada pelas soluções numérica e analítica para diferentes valores de  $kt_h$  e  $d$

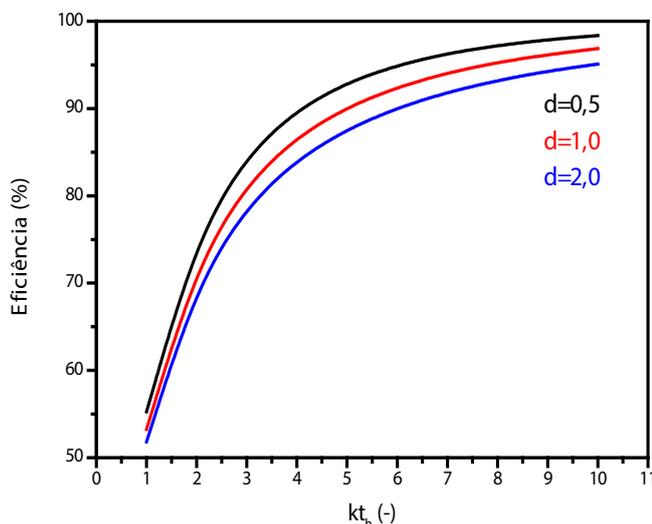


Figura 1 – Curvas de eficiência de tratamento obtidas via solução numérica para a versão linearizada de 1ª ordem da cinética de Michaelis-Menten

#### 4 | CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados pode se concluir que os métodos numéricos utilizados mostraram-se apropriados e eficazes para a resolução do problema de valor

no contorno associado à modelagem matemática de biorreatores de tratamento de efluentes cujo comportamento hidrodinâmico é do tipo fluxo disperso e cuja cinética de degradação do poluente segue a forma linearizada de 1ª ordem da cinética de Michaelis-Menten. A metodologia pode ser igualmente aplicada a outras cinéticas de decomposição do poluente, incluindo a própria cinética de Michaelis-Menten em toda sua completude, configurando-se como uma ferramenta útil para projetos mais precisos dos biorreatores nos quais se conduz a despoluição das águas residuárias visando adequá-las às normas de controle ambiental.

## REFERÊNCIAS

BEQUETTE, B. W. **Process dynamics: modeling, analysis, and simulation**. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 1998.

CONSTANTINIDES, A.; MOSTOUFI, N. **Numerical methods for chemical engineers with MATLAB applications**. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 1999.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

METCALF; EDDY **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. Revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

OLIVEIRA, S.C.; MORILLA, F.C. **Aplicação do shooting method no projeto de reatores de fluxo disperso empregados no tratamento biológico de efluentes** In: Anais do XXI COBEQ - Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, CE, 2016.

RAMIREZ, W. F. **Computational methods for process simulation**. Stoneham: Butterworth Publishers, 1989.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte, Editora da Universidade Federal de Minas Gerais: (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.2), 1996.

WEHNER, J.F.; WILHELM, R.H. **Boundary conditions of flow reactor**. Chem. Eng. Sci. 6(2): 89-93, 1956.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**CARMEN LÚCIA VOIGT** Doutora em Química na área de Química Analítica e Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Especialista em Química para a Educação Básica pela Universidade Estadual de Londrina. Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Experiência há mais de 10 anos na área de Educação com ênfase em avaliação de matérias-primas, técnicas analíticas, ensino de ciências e química e gestão ambiental. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se uma atuação por resultado, como: supervisora de laboratórios na indústria de alimentos; professora de ensino médio; professora de ensino superior atuando em várias graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; palestrante; pesquisadora; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Autora de artigos científicos. Atuou em laboratório multiusuário com utilização de técnicas avançadas de caracterização e identificação de amostras para pesquisa e pós-graduação em instituição estadual.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-231-9

