



# Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3

---

Carmen Lúcia Voigt  
(Organizadora)

 **Atena**  
Editora

Ano 2019

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>

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

**Jamyla Soares Anício Oliveira Félix**

Centro Universitário do Leste de Minas Gerais

Cel. Fabriciano – MG

**Aline Givisiez de Souza**

Centro Universitário do Leste de Minas Gerais

Cel. Fabriciano – MG

**Francine Duarte Castro**

Centro Universitário do Leste de Minas Gerais

Cel. Fabriciano – MG

**RESUMO:** Na produção de biodiesel através do processo de transesterificação, há um grande consumo de água no estágio de purificação do produto e, portanto, deve-se pensar em formas de reuso ou descarte deste efluente gerado. Entretanto, só é possível realizar tais alternativas após tratamento adequado, estabelecido por norma, a fim de garantir que o efluente não proporcione efeitos prejudiciais ao corpo receptor, visando o menor impacto ambiental possível. Com isso, neste trabalho, realizou-se o tratamento do efluente utilizando a reação de Fenton, que basicamente promove a remoção de matéria orgânica por oxidação, sendo os radicais hidroxila os principais agentes do processo. Os radicais são produzidos pela decomposição do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), na presença de catalisadores de íons de ferro. Este tratamento levou à remoção de 90%

da matéria orgânica, e os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo cinético proposto por Chan e Chu (2003), obtendo-se velocidade inicial de reação estimada em  $1/\rho = 3,367 \text{ min}^{-1}$ . Com relação à lixiviação de íons ferro provenientes do resíduo siderúrgico, avaliou-se a influência da temperatura, tempo de contato e da presença do  $H_2O_2$  no processo. Nesses ensaios, comprovou-se que há variação da quantidade lixiviada com o tempo e temperatura, porém não de forma linear e crescente. Na presença de  $H_2O_2$ , observou-se o aumento do teor de lixiviado (ferro ferroso), na mesma temperatura e tempo de contato, em ensaios apenas com água destilada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efluente do biodiesel, Reação de Fenton, Pó de minério, Cinética, Lixiviação do ferro.

**ABSTRACT:** In biodiesel production through the transesterification process, there is a high consumption of water in the stage of purification of the product and, therefore, forms of reuse or disposal of this generated effluent must be investigated. However, these alternatives can only be applied after appropriate treatment, following the laws and normative procedures, in order to reduce environmental impacts. Thus, in this work, the effluent was treated by the Fenton reaction, which promotes the transformation of organic matter by oxidation, having hydroxyl

radicals as the main agents responsible for the process. These radicals are produced by the decomposition of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) in the presence of iron ion catalysts. The process lead to organic matter removal of 90%, and the collected data was better adjusted to the kinetic model proposed by Chan and Chu (2003), with initial reaction rate of  $1/\rho = 3,367 \text{ min}^{-1}$ . Regarding the iron leaching to the aqueous medium, the influence of temperature, contact time and  $H_2O_2$  content in the process were evaluated. In these tests, it was found that the amount of leachate varied with time and temperature, but not in a linear and increasing manner. Concerning the presence of  $H_2O_2$ , it was observed an increasing content of iron ( $Fe^{2+}$ ) in the solution containing hydrogen peroxide. This behavior was not observed when the tests were carried out in distilled water, at the same temperature and contact time.

**KEYWORDS:** Effluent of biodiesel, Fenton reaction, Ore powder, Kinetics, Leaching of iron.

## 1 | INTRODUÇÃO

A forma convencional de obtenção do biodiesel consiste na reação de transesterificação, que ocorre entre os óleos vegetais, residuais ou gorduras animais e álcool (metanol ou etanol), na presença de um catalisador, geralmente alcalino, para formar biodiesel bruto (ésteres metílicos de ácidos graxos ou ésteres etílicos de ácidos graxos) e glicerina. Segundo Santos (2015), a purificação do biodiesel através do método mais adotado, por lavagem úmida, gera volumes consideráveis de efluentes, chegando a uma proporção de até 1:3 (biodiesel: água de lavagem) (BRITO, 2015).

Na água de lavagem da purificação de biodiesel, pode ser verificada a presença de ácidos graxos livres, provenientes do óleo utilizado no processo, parte do álcool usado em excesso na produção (reação de transesterificação), pequenas quantidades do catalisador, parte do óleo que não é convertido no processo e baixa concentração de nitrogênio. Essa combinação de compostos confere ao efluente do biodiesel elevada carga orgânica, que pode ser superior a outros tipos de efluentes, como os de curtumes, frigoríficos e lixiviados de aterros sanitários (GONÇALVES, 2015). O efluente em questão tem coloração branca opaca e, devido à sua composição, os tratamentos biológicos convencionais não são eficientes.

De acordo com Marcelino *et al.* (2013), os Processos Oxidativos Avançados (POA) são tecnologias consolidadas e efetivas de tratamento de água e efluentes para a remoção de poluentes orgânicos não tratáveis por meio de técnicas convencionais, devido à sua elevada estabilidade química e/ ou baixa biodegradabilidade. Os POA's têm atraído grande interesse tanto da comunidade científica como industrial, e têm sido empregados no tratamento e pré-tratamento de compostos não biodegradáveis em águas, atmosferas e solos contaminados, pois convertem a matéria orgânica em  $CO_2$  e  $H_2O$  ou no caso de pré-tratamentos, tornando-os biodegradáveis. Dentre os POAs, o processo de Fenton se destaca.

A reação de Fenton é um exemplo de POA e consiste em um conjunto de reações cíclicas, que utilizam íons de ferro como catalisadores na decomposição do peróxido de hidrogênio para produzir radicais hidroxila, ocorrendo em condições ácidas (pH de 2,5 – 3,0) (ARAÚJO, 2008). As reações envolvidas serão detalhadas a seguir (Eqs. 1-6) (ARAÚJO, 2008; SANTOS, 2014).

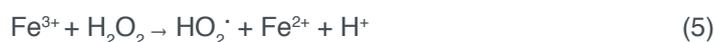
O íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) inicia e catalisa a decomposição do peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), resultando na geração de radicais hidroxila (Eq. 1), que agem oxidando os poluentes orgânicos (Eq. 2), causando decomposição química.



Outras reações ocorrem durante o desenvolvimento do processo Fenton, podendo os radicais hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ) formados oxidarem outro íon ferroso (Eq. 3), além de também reagir com o peróxido de hidrogênio (Eq. 4). Nestes casos, o íon ferroso e o peróxido de hidrogênio estão agindo como agentes “sequestrantes” de radicais hidroxila.



A decomposição do peróxido de hidrogênio pode ser catalisada pelo íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Eq. 5), contudo a velocidade da reação é em menor proporção. Essa reação é conhecida como Fenton-*like* ou Tipo-Fenton. Reações de Fenton-*like* (Eqs. 5-6) permitem a regeneração do íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ).



Também é possível a oxidação da matéria orgânica diretamente pela ação do peróxido de hidrogênio (Eq. 7).



Com relação ao resíduo siderúrgico empregado, propõe-se o estudo da lixiviação, sendo este um parâmetro importante de caracterização, responsável por quantificar o teor de ferro total encontrado no meio aquoso e sua influência com relação ao pH do meio, a fim de reagir na reação de Fenton. Logo, pode-se avaliar se seu emprego é favorável ou não.

Em geral, os testes de lixiviabilidade são realizados pelo contato do material com um solvente, água por exemplo, onde parte dos seus constituintes são dissolvidos. Este processo é chamado de lixiviação, o solvente é chamado de lixiviante e o produto resultante, de lixiviado. A capacidade do material de lixiviar é conhecida como lixiviabilidade. Ensaios de lixiviação são normalmente empregados com a finalidade de se avaliar os impactos ambientais reais e potenciais, do material analisado (CAUDURO, 2003).

Há alguns fatores que influenciam a lixiviação, tanto químicos, como o controle do pH do meio, quanto físicos, que se caracterizam por se relacionar fortemente com as condições de contato entre o líquido e o material sólido: propriedades do sólido, agitação, temperatura, tempo de contato (CAUDURO, 2003).

Neste trabalho, foi investigada a aplicabilidade da reação de Fenton para a remoção da carga orgânica das águas de lavagem do biodiesel. Foi utilizado como fonte de ferro resíduo sólido do setor siderúrgico (pó de minério), sem valor agregado. Optou-se pelo sistema heterogêneo para aproveitamento do resíduo e também pelo menor potencial de geração de lodo, se comparado ao sistema homogêneo. Realizou-se o estudo cinético da reação empregada, bem como ensaios de lixiviação para averiguar a ocorrência da dissolução de ferro do resíduo no meio reacional, assim como a influência dos parâmetros operacionais na lixiviabilidade do ferro em meio aquoso.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 A água de lavagem

O biodiesel foi produzido via catálise homogênea no Laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, em pequena escala, utilizando-se metanol, óleo residual de fritura e hidróxido de potássio (KOH). O efluente utilizado no estudo corresponde às águas de lavagem posteriores à lavagem inicial.

### 2.2 O resíduo siderúrgico

Os finos de minério de ferro foram obtidos através do peneiramento do minério granulado, de procedência das minas de Serra Azul. O resíduo foi cedido por uma indústria siderúrgica regional, que forneceu a composição química do mesmo (Tabela 1). Após o pó de minério ser classificado quanto à granulometria, utilizando um agitador de peneiras marca Solotest, ele permaneceu armazenado em dessecadora para remoção da umidade.

Componente	H <sub>2</sub> O	FeT	Mn	P	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Percentual (%)	4,037	58,02	0,021	0,059	13,33	0,013	1,663	0,060

Tabela 1 – Composição química do resíduo

Fonte: Empresa cedente do resíduo, 2017.

## 2.3 Ensaios de reação de Fenton

Os estudos de oxidação avançada com reagente de Fenton foram realizados à temperatura ambiente, em reatores estáticos de bancada sob agitação constante, contendo 20 mL de efluente. Nos ensaios, fixou-se a concentração do resíduo em 2 g/L e variou-se a concentração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> P.A. 35% v/v) em 500, 250 e 100 mg/L. Considerou-se o início do processo oxidativo a partir da adição de solução de peróxido de hidrogênio. O efluente foi acidificado com solução 0,5 M de ácido clorídrico (HCl).

Alíquotas de 10 mL foram retiradas para determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO) em tempos previamente determinados (10, 20, 30 e 60 minutos de reação), para concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> iguais a 100 e 250 mg/L. Para [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=500 mg/L, as alíquotas foram recolhidas após 30 e 60 minutos de reação. As amostras retiradas tiveram a reação interrompida com a adição de 10 mL de solução de sulfito de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) em quantidade equimolar ao peróxido residual.

Para quantificar o peróxido de hidrogênio residual foi realizado ensaio preliminar com duração de 10 minutos. O consumo de peróxido de hidrogênio foi monitorado espectrofotometricamente, com o máximo de absorvância em 450 nm, pela geração de peroxovanádio de cor castanha, formado pela reação de peróxido de hidrogênio e metavanadato de amônio (GONÇALVES, 2016). Para a análise, foram adicionados 4 mL de amostra em um balão de 10 mL, juntamente com 1,6 mL de metavanadato de amônio (NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>) e o volume foi completado com água deionizada, fazendo-se então a leitura da absorvância (ABS) no espectrofotômetro.

Foi elaborada uma curva analítica ABS versus [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] a partir da medida da absorvância de amostras com concentrações conhecidas de peróxido de hidrogênio, tratadas segundo o procedimento anterior, para quantificar o peróxido de hidrogênio residual (ARAÚJO, 2008). A solução de vanadato de amônio foi preparada dissolvendo-se 1,17 g de NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> em 5,56 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) de concentração igual a 9 mol L<sup>-1</sup> e completando-se o volume até 100 mL com água deionizada (OLIVEIRA *et al.*, 2001). Todas as amostras tratadas, quando necessário, tiveram o pH corrigido para valores inferiores a 3, sendo então filtradas e colocadas sob agitação de 1000 rpm por um período de 2 horas, a fim de remover Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> residual, que interfere na análise de DQO (WANG *et al.* 2013).

As análises de DQO do efluente bruto, acidificado e das amostras tratadas foram realizadas em triplicata, segundo método 5220 D, descrito pela *American Public Health Association* (APHA, 2005).

## 2.4 Estudo cinético da Reação de Fenton

Para determinação dos parâmetros cinéticos foram testadas equações linearizadas para os modelos de primeira e segunda ordem. A equação de taxa apresentada na Equação 8 é tomada como base para a dedução das equações linearizadas dos modelos, sendo admitido que o reagente A é o limitante, enquanto que B, por estar em excesso, tem sua concentração () considerada uma constante no meio reacional (SCHMAL, 2017).

$$(-r_A) = kC_A^\alpha C_B^\beta \quad (8)$$

Onde:

$(-r_A)$  = taxa de consumo de “A” em função do tempo;

$k$  = constante cinética da reação;

$C_A$  = concentração de “A” em um determinado tempo;

$C_B$  = concentração de “B” em um determinado tempo;

$\alpha$  = ordem em relação ao reagente “A”;

$\beta$  = ordem em relação ao reagente “B”.

As Equações 9 e 10 fazem referência à linearização obtida no método integral para os modelos de primeira e segunda ordem, respectivamente.

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -k^*t \quad (9)$$

$$\frac{1}{C_A} = k^*t + \frac{1}{C_{A0}} \quad (10)$$

Onde:

$k^*$  = constante cinética da reação;

$t$  = tempo;

$C_A$  = concentração de “A” em um determinado tempo;

$C_{A0}$  = concentração inicial de “A”.

A partir dos dados experimentais obtidos, determinaram-se os parâmetros cinéticos de forma analítica, a partir da construção de uma curva do logaritmo neperiano ( $\ln$ ) da DQO/DQO<sub>0</sub> e de uma curva do inverso da DQO, ambas em relação ao tempo.

Também foi testado o modelo cinético proposto por Chan e Chu (2003), apresentado na Equação 11:

$$C/C_0 = 1 - t/(\rho + \sigma t) \quad (11)$$

Para resolução das constantes, a Equação 11 foi linearizada a:

$$t/(1 - C/C_0) = \rho + \sigma t \quad (12)$$

onde C é a concentração (absorbância) do produto remanescente no tempo t (min) e ,C<sub>0</sub> de maneira análoga, a concentração (absorbância) do poluente orgânico no tempo 0.

Plotando t/ (1- C/C<sub>0</sub>) versus t, obtém-se uma reta com intercessão em p (min) e inclinação em σ (adimensional), que são duas constantes relacionadas com a cinética da reação: -1/p é a velocidade inicial da reação e 1/σ a conversão máxima alcançada no final da reação.

## 2.5 Ensaio de lixiviação do resíduo

Para verificar a possibilidade de ocorrência de lixiviação do ferro presente no resíduo para a solução, foram realizadas determinações do teor de ferro dissolvido no meio reacional. Foram realizados ensaios com o pó de minério (2 g/L) e água destilada, em pH aproximadamente 3, os quais foram conduzidos nas seguintes temperaturas: ambiente, 30, 40 e 50° C, e com tempo de contato de 2, 5, 10 e 60 minutos. Após cada ensaio, a amostra foi filtrada e procedeu-se com a determinação do teor de ferro lixiviado.

Para determinação do teor de ferro total, foi aplicado o método da *orto*-fenantrolina, por espectrofotometria UV visível, descrito pela APHA (2005). Neste método, é utilizado um agente ligante ou complexante para o ferro, formando-se um complexo de coloração com alta capacidade de absorver a radiação incidida. Primeiramente, adicionou-se um agente redutor (cloridrato de hidroxilamina), a fim de que todo ferro ficasse no estado de oxidação Fe (II). Foi utilizada uma solução tampão para regular o pH em aproximadamente 3,3, tendo em vista que a *orto*-fenantrolina se complexa com o ferro em pH baixo. Construiu-se uma curva de calibração, para a qual foi necessário o preparo de uma solução padrão de ferro total, utilizando sulfato ferroso amoniacal e ácido sulfúrico. Na determinação do teor de ferro ferroso, utilizou-se o mesmo método, porém não foi necessário utilizar o agente redutor, já que pretendia-se quantificar apenas o estado de oxidação 2<sup>+</sup>.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização da água de lavagem

A água de lavagem apresentou pH inicial de 9,88 ± 0,05 e DQO=8288,89 mgO<sub>2</sub>/L. O caráter alcalino do efluente deve-se, provavelmente, ao catalisador básico utilizado na reação de transesterificação. Gonçalves e colaboradores (2014)

obtiveram considerável remoção na DQO de um efluente real de biodiesel produzido por transesterificação alcalina, utilizando óleo residual e etanol, apenas acidificando o mesmo. Assim, neste trabalho, analisou-se a DQO do efluente após acidificação, que foi de 7475,56 mgO<sub>2</sub>/L. Adotou-se a DQO pós acidificação como parâmetro no cálculo da eficiência da reação de Fenton. O fato da acidificação não ter sido relevante neste trabalho, em termos de remoção de carga orgânica, pode decorrer das características distintas dos efluentes em estudo, uma vez que Gonçalves *et al.* (2014) não citaram qual catalisador utilizado e qual água de lavagem foi tratada e, ainda, o álcool foi distinto entre os trabalhos. Após acidificação, o pH das amostras foi de 2,88 ± 0,07.

### 3.2 Classificação granulométrica do resíduo siderúrgico

O pó de minério foi utilizado como catalisador na reação de Fenton. O resíduo foi previamente classificado quanto à granulometria (Figura 1). Neste trabalho, optou-se por utilizar o menor diâmetro de partícula (< 75 µm), devido à possibilidade de levar a uma maior área disponível para contato com o efluente.

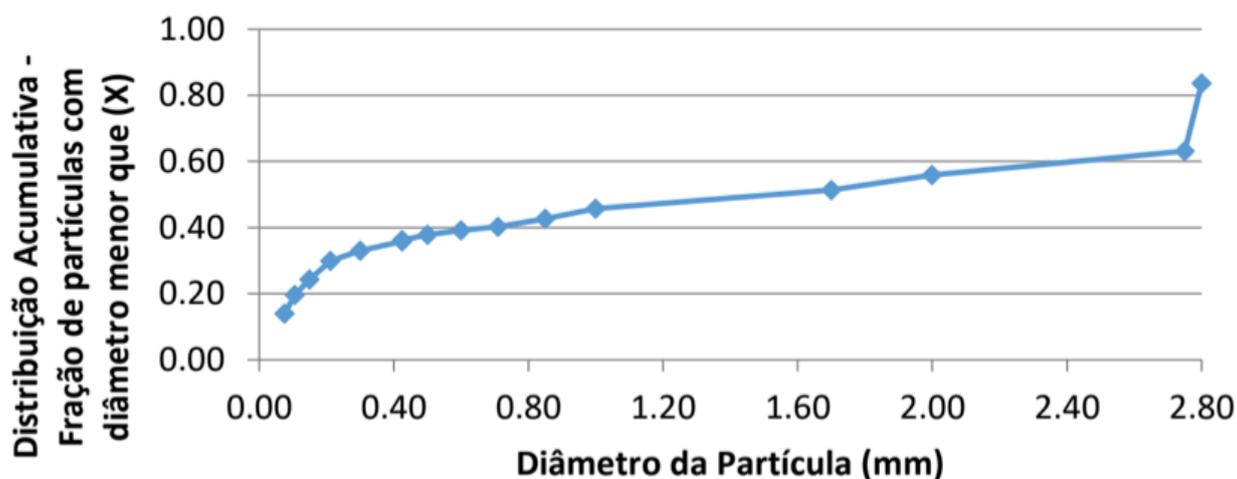


Figura 1 - Distribuição granulométrica do minério Serra Azul

Fonte: Elaboração própria, 2018.

### 3.3 Ensaio da reação de Fenton

Inicialmente, realizaram-se ensaios de Fenton para [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=500 mg/L, com duração de 30 e 60 minutos. Obteve-se remoção na DQO de 75,8 e 93,4%, respectivamente. Apesar do resultado satisfatório para o tempo reacional de 60 minutos, diminuiu-se a [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] para 250 e 100 mg/L, bem como realizaram-se os ensaios de remoção da DQO nos tempos determinados, cujos resultados obtidos encontram-se na Figura 2.

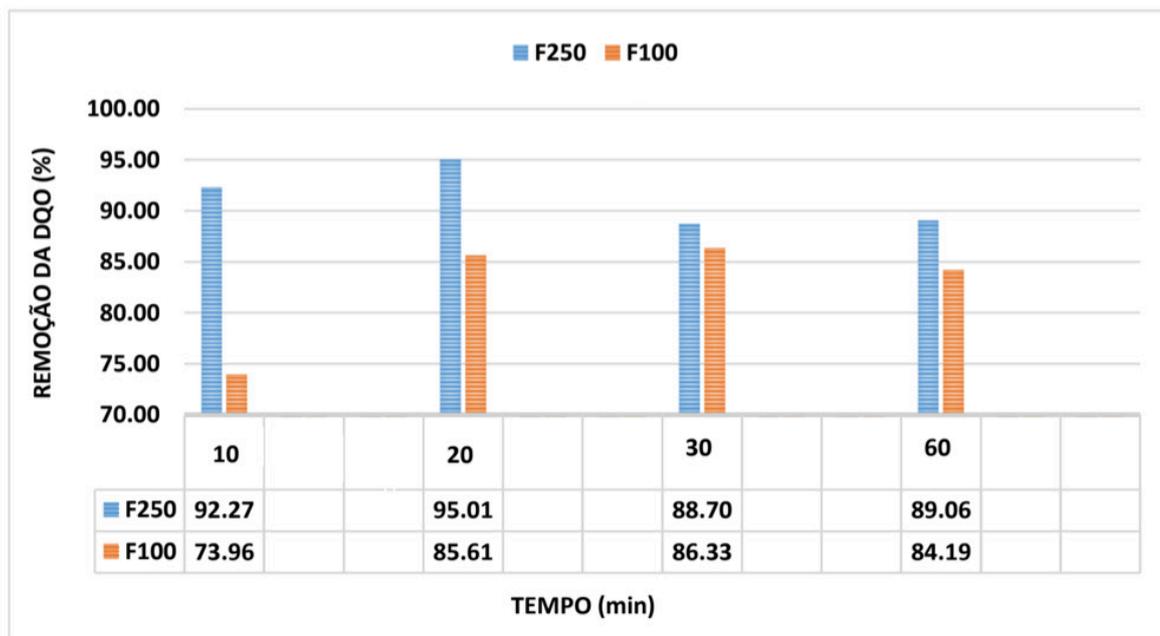


Figura 2 – Remoção da DQO para ensaios com Reação de Fenton com  $[H_2O_2]=100$  mg/L (F100) e com  $[H_2O_2]=250$  mg/L (F250)

Fonte: Autoria própria, 2018.

Pela Figura 2, é visto que a reação de Fenton com  $[H_2O_2]=250$  mg/L, apresentou melhor resultado na remoção da DQO, que chegou a 92 e 95%, em 10 e 20 minutos de reação, respectivamente. Essa melhoria nos percentuais de remoção, em comparação com a maior  $[H_2O_2]$ , de 500 mg/L, pode ter ocorrido em razão da concentração de resíduo empregada não ser suficiente para catalisar a reação em excesso de  $H_2O_2$ , que por sua vez, ainda pode ter sequestrado radicais hidroxila. Assim, para  $[H_2O_2]=500$  mg/L, faz-se necessário o aumento da área de superfície (concentração) do mineral (ARAÚJO, 2008). Por sua vez, o ensaio de Fenton com  $[H_2O_2]=100$  mg/L apresentou menores percentuais de remoção da DQO, sendo 73,9 e 85,6% para 10 e 20 minutos de reação, respectivamente.

Araújo (2008) estudou o uso de hematita no tratamento de soluções contendo corante reativo através de reação de Fenton Heterogênea. Em seu trabalho, constatou que, em pH 2,5, o aumento da  $[H_2O_2]$  propiciou maior percentual de remoção da DQO, enquanto que para o mesmo pH, o aumento na concentração do resíduo melhorou consideravelmente somente a descoloração do efluente. No citado estudo, a condição favorável foi obtida para  $[H_2O_2]=800$  mg/L e 20 g/L de concentração da hematita, em 120 minutos de reação. Neste trabalho, apesar de não ter sido contemplada a variação da concentração do resíduo, obtiveram-se melhores percentuais de remoção da DQO para reação de Fenton Heterogênea com  $[H_2O_2]=250$  mg/L em comparação com  $[H_2O_2]=100$  mg/L, o que equivale a uma proporção de  $[H_2O_2]:[resíduo]$  de 1:8 e 1:20, respectivamente.

Os menores percentuais de remoção da DQO para F100, devem-se provavelmente à formação de radicais hidroxila em quantidade insuficiente para oxidar toda a matéria

orgânica presente no efluente. Esse fato também pode estar relacionado à baixa concentração de peróxido de hidrogênio em relação à concentração do resíduo. Segundo Kwan e Voelker (2002), parte do peróxido de hidrogênio se decompõe em  $O_2$  e  $H_2O$  na superfície de mineral. Diante disso, havendo excesso de ferro (maior área disponível), o peróxido de hidrogênio pode ter sido totalmente consumido antes do fim da reação e não restou oxidante suficiente para continuar o ciclo de reações.

A partir dos resultados obtidos, estabeleceu-se a  $[H_2O_2]=250$  mg/L como condição ótima para tratamento do efluente.

### 3.4 Estudo cinético da Reação de Fenton

A cinética da reação de Fenton foi determinada com base na evolução da DQO ao longo de 60 minutos da reação (Figura 3), sendo as alíquotas coletadas aos 1, 2, 5, 10, 20, 30 e 60 minutos. As condições adotadas para o estudo foram  $[H_2O_2]=250$  mg/L (concentração ótima determinada) e  $[resíduo]=2$ g/L.

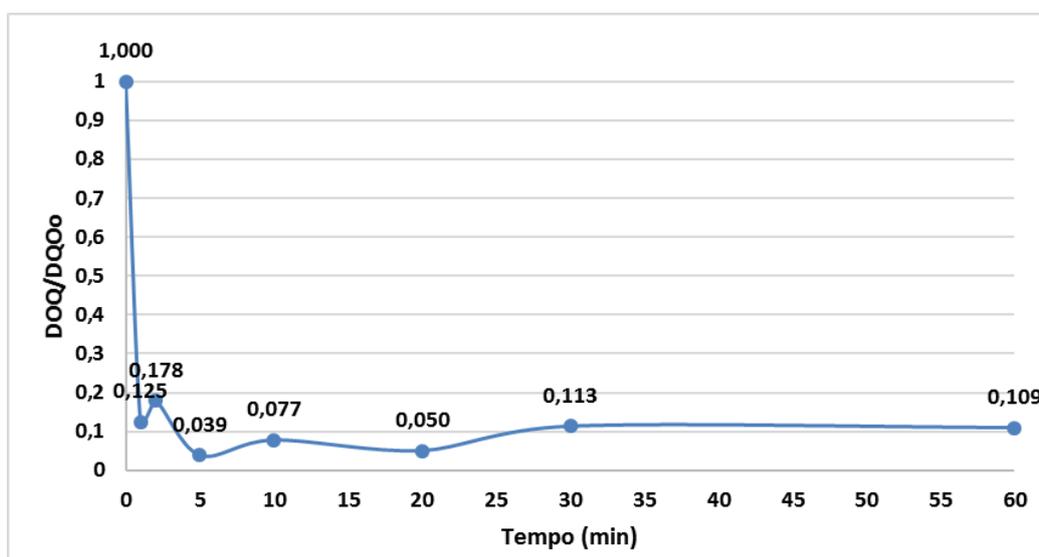


Figura 3 – Variação da DQO ao longo de 60 min da reação de degradação água de lavagem do biodiesel por processo Fenton

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para avaliar qual modelo cinético melhor se ajustou aos dados experimentais dos testes de degradação do efluente do biodiesel por Fenton, foram testados os modelos de primeira e segunda ordem. Os parâmetros cinéticos (ordem e constante cinética) da reação de Fenton (Tabela 2) foram determinados pelo método integral.

Os ajustes em ambos os modelos foram realizados considerando-se as alíquotas coletadas aos 1, 2, 10 e 20 minutos de reação.

Ordem da reação (n)	1	2
Constante cinética (k)	0,0594 min <sup>-1</sup>	9E-5 L.mg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup>
R <sup>2</sup>	0,8873	0,9601

Tabela 2 – Parâmetros cinéticos para a reação de Fenton

Fonte: A autoria própria, 2018.

Gonçalves (2015) realizou o estudo cinético de efluente do biodiesel gerado a partir de óleo de soja, algodão e gordura animal, utilizando o processo de transesterificação alcalina com metanol e KOH. Em média, o efluente bruto apresentou DQO = 3894 ± 603 mgO<sub>2</sub>/L. Inicialmente, o efluente foi submetido ao tratamento biológico com aeração prolongada (sem adição de meio suporte e operado após 27 dias), sendo o Reagente de Fenton alternativa de pós-tratamento. Em seu trabalho, para [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=1150 mg/L e [Fe<sup>2+</sup>]=375 mg/L, o autor obteve remoção acima de 85% da DQO e o modelo cinético se ajustou ao de pseudossegunda ordem, com constante cinética estimada em k = 1,08 x 10<sup>-1</sup>L.mol<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.

Também Mitre (2012) obteve ajuste cinético de pseudossegunda ordem nos primeiros 5 minutos da reação de Fenton no tratamento de águas contaminadas por diesel/biodiesel. Por exemplo, em uma amostra constituída somente por biodiesel, com DQO<sub>0</sub> = 1300 mgO<sub>2</sub>/L e nas seguintes condições experimentais DQO<sub>0</sub>: [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]: [Fe<sup>2+</sup>] = 1:0,4:0,4, a constante cinética foi estimada em 6,4 x 10<sup>-2</sup> L.mg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>.

Pelos dados da Tabela 2, inicialmente pode-se inferir que o modelo cinético que melhor se ajustou aos dados de decaimento da DQO deste experimento foi o modelo de pseudossegunda ordem, com constante cinética estimada em k = 9,0 x 10<sup>-5</sup> L.mg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>.

Por outro lado, ao ser observada a Figura 3, esta demonstrou que a degradação dos compostos presentes no efluente em estudo deu-se de maneira muito rápida, sendo a estabilização atingida logo nos primeiros minutos de reação, seguido de uma região de menor velocidade. Este comportamento indica que a reação ocorre em dois estágios, sendo rápida nos minutos iniciais e muito mais lenta nos minutos posteriores. A primeira etapa da reação possivelmente é iniciada pelos radicais hidroxila (·OH), resultantes da reação do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e dos íons Fe<sup>2+</sup> (Eq. 1). Nesta etapa, o peróxido de hidrogênio é consumido intensamente, devido à formação catalítica dos radicais ·OH. Porém, o Fe<sup>3+</sup> produzido na Equação 1 pode também reagir com o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, formando radicais mais fracos, com menor poder oxidante (HO<sub>2</sub>·), os quais diminuem a quantidade do peróxido de hidrogênio. À medida que a [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] reduz-se na solução, a formação de ·OH é prejudicada, iniciando-se a etapa lenta da reação.

Chan e Chu (2003) obtiveram comportamento cinético semelhante (etapa rápida e lenta combinadas) no estudo da degradação da atrazina por processo Fenton e propuseram um modelo cinético para o comportamento observado na reação. Deste modo, aplicou-se neste trabalho o modelo proposto por Chan e Chu (2003), para

validação de tal modelo aos dados experimentais obtidos no decaimento da DQO durante a reação de Fenton aplicada à água de lavagem do biodiesel. A Figura 4 apresenta a curva cinética obtida para o modelo proposto por Chan e Chu (2003).

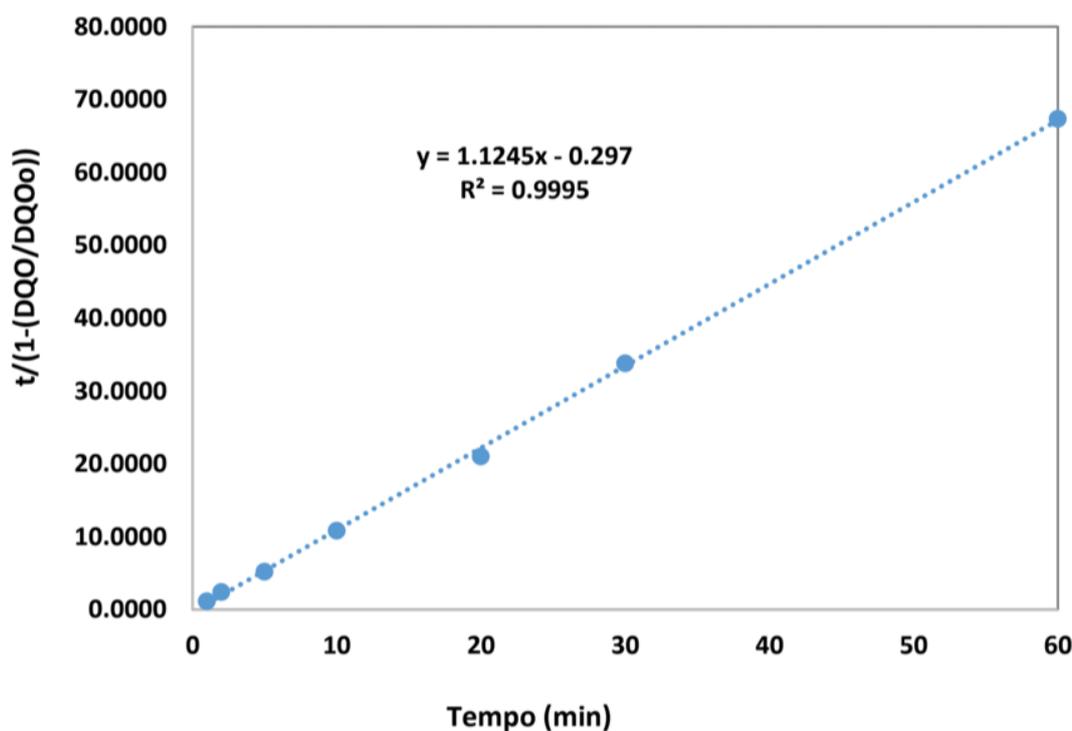


Figura 4 – Estudo cinético de decaimento da DQO para modelo proposto por Chan e Chu (2003)

Fonte: Autoria própria, 2018.

Comparando-se os resultados de  $R^2$  obtidos, pode-se afirmar que a cinética da Reação de Fenton para o tratamento do efluente em estudo foi bem relacionada ao modelo proposto por Chan e Chu (2003). A velocidade inicial da reação foi estimada em  $= 3,367 \text{ min}^{-1}$ . Mitre (2012) também testou o modelo de Chan e Chu (2003) em seu estudo e, da mesma maneira que neste experimento, o modelo em questão se ajustou bem à maioria das amostras, com exceção da água contaminada somente por diesel.

### 3.5 Ensaios de lixiviação do resíduo

As Tabelas 3 e 4 ilustram, respectivamente, os resultados de lixiviação de Ferro Total (FeT) e Ferro Ferroso solúvel obtido ao longo de 60 minutos. É importante esclarecer que por se tratar de um resíduo siderúrgico heterogêneo, os resultados de ferro solúvel nem sempre apresentam o mesmo valor para uma mesma dosagem de resíduo. Sendo assim, as dosagens de ferro citadas nos ensaios de lixiviação referem-se às concentrações de ferro total solúvel mensuradas para a dosagem de 2 g/L de resíduo, o qual é composto por 58,02 % de FeT.

Tempo (min)	Concentração FeT (mg/L)			
	Temp. Ambiente	30°C	40°C	50°C
2	1,9420 ± 0,0069	1,7741 ± 0,0052	0,5368 ± 0,0078	1,7409 ± 0,0069
5	1,9679 ± 0,0045	1,9810 ± 0,0052	1,1350 ± 0,0052	1,8018 ± 0,0069
10	3,8054 ± 0,0069	2,7640 ± 0,0045	2,8729 ± 0,0131	3,7335 ± 0,0000
60	3,9217 ± 0,0052	6,5535 ± 0,0111	5,6172 ± 0,0120	4,1749 ± 0,0026

Tabela 3 – Lixiviação do Ferro Total (FeT) para pH = 3,01 ± 0,0620

Fonte: A autoria própria, 2018.

De acordo com a Tabela 3, verifica-se que para uma mesma temperatura, a liberação de ferro solúvel é crescente e contínua ao longo dos 60 minutos. Amorim (2007) também observou lixiviação de ferro total solúvel crescente e contínua do pó de desempoeiramento da ala de corrida do Alto-Forno, à temperatura de 25°C, durante tempo de contato de 41 horas.

Para o mesmo tempo de contato, variando-se a temperatura, não foi observada lixiviação crescente. Aos 2 e 10 minutos, o ferro total solúvel foi maior em temperatura ambiente, enquanto que aos 5 e 10 minutos, os resultados foram expressivos para a temperatura de 30°C.

Tempo (min)	Concentração Fe(II) (mg/L)			
	Temp. Ambiente	30°C	40°C	50°C
2	1,1499 ± 0,0000	1,0157 ± 0,0000	0,4489 ± 0,0211	0,4787 ± 0,0365
5	1,2394 ± 0,0000	1,1648 ± 0,0211	0,7843 ± 0,0422	1,4929 ± 0,0760
10	1,2841 ± 0,0000	1,3587 ± 0,0211	1,8359 ± 0,0211	1,8509 ± 0,0211
60	1,8658 ± 0,0365	2,8949 ± 0,0000	2,6264 ± 0,0365	3,1484 ± 0,0211

Tabela 4 – Lixiviação do Ferro Ferroso – Fe (II) para pH = 3,01 ± 0,0620

Fonte: A autoria própria, 2018.

Assim como o ferro total, o ferro ferroso dissolvido apresentou comportamento crescente e contínuo ao longo dos 60 minutos de contato. A maior concentração de Fe<sup>2+</sup> em solução foi observada no ensaio à temperatura de 50°C, aos 60 minutos, que totalizou 3,1484 ± 0,0211 mg/L.

Das Tabelas 3 e 4, depreende-se que o teor de ferro férrico pode ser obtido subtraindo-se o teor de ferro ferroso do FeT. Sendo assim, de modo geral, exceto para a temperatura de 50°C, observou-se que ocorreu aumento da [Fe<sup>3+</sup>] para o maior tempo de contato. Para a temperatura ambiente, o aumento de íons férricos aos 60 minutos, no ensaio de lixiviação, provavelmente pode justificar a menor remoção da DQO observada na Reação de Fenton com [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] = 250 mg/L, nesse tempo reacional. Nessa condição, a menor remoção da DQO pode ser explicada pela oxidação dos íons ferrosos e disponibilidade reduzida de radicais hidroxila.

Os resultados da análise de ferro discutidos até aqui se referem apenas aos

experimentos realizados na ausência do efluente. Araújo (2008) comparou a lixiviação da hematita na ausência e presença de  $H_2O_2$ . Em seu trabalho, foi admitido que não ocorre aumento na concentração de íons férrico e ferroso com aumento na concentração de peróxido de hidrogênio, motivo pelo qual os ensaios foram realizados com a maior concentração utilizada (800 mg/L). De maneira análoga, no presente trabalho foram realizados ensaios de lixiviação na presença de  $H_2O_2$ . As condições foram restringidas à temperatura ambiente, tempo de contato de 10 e 20 minutos, concentração de peróxido de hidrogênio de 250 e 500 mg/L, esta última por ser a maior concentração do oxidante utilizada e as demais por comporem as condições em que se deu a Reação de Fenton com maior eficiência. Os resultados obtidos com estes ensaios de lixiviação encontram-se na Tabela 5.

[ $H_2O_2$ ] (mg/L)	Tempo (min)	[FeT] (mg/L)	[ $Fe^{2+}$ ] (mg/L)
250	10	$3,3124 \pm 0,0366$	$2,5517 \pm 0,0000$
	20	$4,5387 \pm 0,0197$	$3,5808 \pm 0,0000$
500	10	$3,6818 \pm 0,0145$	$3,4913 \pm 0,0000$
	20	$5,0077 \pm 0,0340$	$3,7597 \pm 0,0633$

Tabela 5 – Lixiviação do pó de minério à temperatura ambiente e na presença de  $H_2O_2$  para  $pH = 3,03 \pm 0,0714$

Fonte: Autoria própria, 2018.

A partir dos dados da Tabela 5, pode-se afirmar que a presença de peróxido de hidrogênio contribui para o aumento crescente da lixiviação, o que também fora observado por Araújo (2008). Também é visto que os íons ferrosos estão presentes em maior concentração no lixiviado.

Em relação ao aumento de concentração do agente oxidante, não foi observado aumento expressivo da lixiviação, confirmando a suposição feita por Araújo (2008) ao utilizar a maior concentração nos ensaios.

Apesar do aumento de espécies lixiviadas na presença de  $H_2O_2$ , as concentrações de FeT obtidas em solução não são relevantes, já que, teoricamente, a concentração de FeT presente no resíduo foi de 1160,4 mg/L, e na condição ótima de reação de Fenton, conforme Tabela 3, teoricamente o ferro total solúvel seria de  $3,3124 \pm 0,0366$  e  $4,5387 \pm 0,0197$  (mg/L) aos 10 e 20 minutos, respectivamente.

A presença de ferro dissolvido, embora em pequena quantidade, não permite descartar que estejam ocorrendo reações do sistema Fenton também na fase aquosa, o que caracteriza um sistema homogêneo. Entretanto, uma maior eficiência da reação foi obtida em presença de maior quantidade do resíduo, podendo-se prever que a reação de degradação da matéria orgânica presente em águas de lavagem do biodiesel pelo processo Fenton com pó de minério também esteja ocorrendo na superfície do resíduo, o que caracteriza um sistema heterogêneo.

## 4 | CONCLUSÃO

O efluente gerado pela lavagem da produção do biodiesel apresentou alta carga orgânica, confirmando a necessidade de ser submetido a um tratamento para o seu descarte adequado. Com esse estudo, verificou-se que a reação de Fenton utilizando pó de minério demonstrou bom potencial de remoção da DQO presente nas amostras de águas de lavagem de biodiesel, viabilizando o reaproveitamento de resíduo sem valor agregado para a indústria siderúrgica e que seria descartado no meio ambiente.

Foi obtida eficiência na remoção da DQO em valor superior a 90%, com 10 minutos de reação, para  $[H_2O_2]=250$  mg/L e 2 g/L do pó de minério, sendo essa a relação ótima obtida entre concentrações de  $H_2O_2$  e resíduo. Após realizado o estudo da cinética da reação de Fenton, constatou-se que o modelo cinético proposto por Chan e Chu (2003) demonstrou elevada aplicabilidade, apresentando coeficiente de regressão linear superior a 0,99, denotando um bom ajuste aos dados experimentais. A velocidade inicial da reação foi estimada em  $= 3,367 \text{ min}^{-1}$ .

Os ensaios de lixiviação, por sua vez, revelaram o comportamento com resíduo em algumas condições específicas, demonstrando a importância de um estudo prévio, a fim de analisar e encontrar a eficiência máxima. Além disso, ensaios na presença de  $H_2O_2$  confirmaram o aumento da lixiviação do ferro ferroso, contribuindo para o desenvolvimento do tratamento e confirmando a eficiência observada na remoção da DQO.

## REFERÊNCIAS

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 21ª ed., Washington D.C., USA, 2005.

ARAÚJO, F. V. D. F. **Estudo do processo Fenton Heterogêneo utilizando hematita ( $Fe_2O_3$ ) como catalisador na descoloração de soluções de corante reativo**. 2008. 183f. Tese (Doutorado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRITO, G. F. S. **Avaliação dos processos Fenton e foto-Fenton no tratamento da água de lavagem do biodiesel de soja**. 2015. 86f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CAUDURO, F. **Avaliação experimental de procedimentos de lixiviação de resíduos**. 2003. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

CHAN, K. H.; CHU, W. **Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine**. *Chemosphere*, v.51, p.305-311, 2003.

GONÇALVES, L. O. *et al.* **Tratamento do efluente gerado na produção de biodiesel por processo oxidativo avançado: Reagente de Fenton**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

GONÇALVES, L. O. **Tratamento de efluentes da produção de biodiesel pela combinação**

**de processos biológicos e oxidativos avançados.** 2015. 122f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, B. R. **Tratamento de efluente da produção de biodiesel utilizando processos físico-químicos e reações de Fenton.** 2016. 99f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

KWAN, W. P.; VOELKER, B. M. M. **Decomposition of Hydrogen peroxide and organic compounds in the presence of dissolved iron and ferrihydrite.** *Environ. Sci. Technol.* v. 36, 1467-1476, 2002.

MARCELINO, R. B. P.; FRADE, P. R.; AMORIM, C. C.; LEÃO, M. M. D. **Tendências e desafios na aplicação de tecnologias avançadas para o tratamento de efluentes industriais não biodegradáveis: atuação do grupo de pesquisa POA Control da UFMG.** *Revista da Universidade Federal de Minas Gerais*, v. 20, n. 2, p. 359-389, 2013.

MITRE, T. K. **Estudo da aplicação dos processos Fenton e foto-Fenton no tratamento de águas contaminadas por diesel/biodiesel.** 2012. 167f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, M. C. *et al.*, **Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio em processo de fotodegradação por reação foto-Fenton.** *Química Nova*, v. 24, p. 188-190, 2001.

SANTOS, L. C. **Avaliação de parâmetros operacionais na cinética de degradação do antibiótico ciprofloxacino pelo processo foto-Fenton.** 2014. 91f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SCHMAL, M. **Cinética e reatores: aplicação à engenharia química: teoria e exercícios.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2017.

WANG, Y., LI, W. & IRINI, A., **A novel and quick method to avoid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> interference on COD measurement in Fenton system by Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> reduction and O<sub>2</sub> oxidation.** *Water Science & Technology*, p. 1529-1535, 2013.

## **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

