



Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

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

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
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  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.ª Dr.ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

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

E57 As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente  
[recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. –  
Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente  
a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 1)

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-85-7247-429-0  
DOI 10.22533/at.ed.290192506

1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos  
econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique  
Ajuz. II. Série.

CDD 658.5

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

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

Atena  
Editora

Ano 2019

## APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
CIDADES SUSTENTÁVEIS: PRÁTICAS PARA A RECUPERAÇÃO DAS ÁGUAS	
Aline Pereira Gaspar Karen Niccoli Ramirez	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
APROVEITAMENTO DA ÁGUA DE CHUVA EM EMPREENDIMENTOS RURAIS: CAPTAÇÃO, ARMAZENAMENTO E UTILIZAÇÃO	
Natalia da Rocha Pinto Elfride Anrain Lindner	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>31</b>
PURIFICAÇÃO DE ÁGUA DOMÉSTICA UTILIZANDO PROCESSOS DE FILTRO BIOLÓGICO, FOTOCATÁLISE DE TiO <sub>2</sub> E ADIÇÃO DE MORINGA	
Maria Marcyara Silva Souza Francisco Wellington Martins da Silva Antônia Mayara dos Santos Mendes Quezia Barboza Rodrigues Juan Carlos Alvarado Alcócer	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>41</b>
DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA UTILIZANDO BOMBA DE ÁGUA COM ENERGIA MOLECULAR E TUBOS DE BOROSSILICATO	
Igor José Langer Luis Eduardo Palomino Bolivar	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>47</b>
CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO E REVISÃO DAS TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO DA ÁGUA PRODUZIDA NOS CAMPOS MADUROS DA BACIA DO RECÔNCAVO	
Thaís Freitas Barbosa Victor Menezes Vieira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925065</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>60</b>
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE QUATRO SUB-BACIAS DE DRENAGEM DE PONTA GROSSA-PR	
Rafaela Paes de Souza Barbosa Gustavo Forastiere Simoneli Maria Magdalena Ribas Döll Mayra Alves Donato	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925066</b>	

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>73</b>
VERIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE HÍDRICA DA LAGOA COSTEIRA DE JACAREPAGUÁ NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	
Ana Carolina Silva de Oliveira Lima Ana Cláudia Pimentel de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925067</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>77</b>
POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E TOXICIDADE DE PRODUTOS COMERCIAIS À BASE DE FUMO ( <i>NICOTIANA TABACUM</i> ) UTILIZADOS EM AGRICULTURA ORGÂNICA	
Magda Regina Santiago Lígia Maria Salvo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925068</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>85</b>
CONSCIENTIZAÇÃO AMBIENTAL E GEOTÉCNICA: CARTILHA INFANTIL E O PROJETO GEOPREVENÇÃO	
Carla Vieira Pontes Talita Gantus de Oliveira Vitor Pereira Faro Roberta Bomfim Boszczowski	
<b>DOI 10.22533/at.ed.2901925069</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>95</b>
AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CAMADA DE COBERTURA NA ESTABILIDADE EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	
Alison de Souza Norberto Rafaella de Moura Medeiros Maria Odete Holanda Mariano	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250610</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>104</b>
AVALIAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE (RSS) DE UM HOSPITAL MATERNIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	
Leonardo de Lima Moura Claudio Fernando Mahler	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250611</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>117</b>
UM ESTUDO SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DE UMA USINA DE RECICLAGEM DE PAPEL PARA UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR EM MANHUAÇU	
Millena Gabriela Gualberto de Souza Nandeyara de Oliveira Costa Glaucio Luciano de Araujo Marcela Moreira Couto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250612</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>126</b>
BIOGÁS: O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO GÁS METANO GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS	
Daniela Cristiano Rufino	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250613</b>	

<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>138</b>
PRODUÇÃO DE BIOETANOL UTILIZANDO HIDROLISADO CELULÓSICO DE BIOMASSA	
Cristian Jacques Bolner de Lima	
Francieli Fernandes	
Charles Souza da Silva	
Juniele Gonçalves Amador	
Charles Nunes de Lima	
Monique Virões Barbosa dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>146</b>
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETOS DE SUÍNOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PROPRIEDADES RURAIS DA REGIÃO DE CANOINHAS-SC	
Bruna Weinhardt da Silveira	
Leila Cardoso	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>150</b>
MODELAGEM DE BIORRETORES EM SÉRIE E COM RECICLO PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO INDUSTRIAL	
Guilherme Guimaraes Ascendino	
Juan Canellas Bosch Neto	
Laura de Oliveira Martins Torres	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>166</b>
O USO DO HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	
Gustavo Destefani Picheli	
Luiz Carlos Vieira Guedes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>183</b>
ENERGIA SOLAR: PANORAMA BRASILEIRO	
Douglas Mito Cerezoli	
Leonardo Vinhaga	
Camila Ricci	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250618</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>195</b>
ECONOMIA DE ENERGIA: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL – ESTUDO DE CASO NO BLOCO I DO UNIPAM	
Daniel Marcos de Lima e Silva	
Maísa de Castro Silva	
Marcelo Ferreira Rodrigues	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250619</b>	

<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>211</b>
USINAS SOLARES FLUTUANTES EM RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS: UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA PARA AUMENTAR A DEMANDA DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA REGIÃO NORDESTE	
<a href="#">Jéssica Beatriz Dantas</a> <a href="#">Antonio Ricardo Zaninelli do Nascimento</a> <a href="#">Thayse Farias de Barros</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>222</b>
CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTES NATURAIS	
<a href="#">José Waltrudes Castanheira Pereira</a> <a href="#">Márcio Cataldi</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250621</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>238</b>
AVALIAÇÃO ANALÍTICA DAS EFICIÊNCIAS TÉRMICAS E ELÉTRICAS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO ACOPLADO A UM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA	
<a href="#">Maxwell Sousa Costa</a> <a href="#">Anderson da Silva Rocha</a> <a href="#">Lucas Paglioni Pataro Faria</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250622</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>252</b>
ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO NAS REGIÕES NOROESTE E SUL DO ESTADO DO CEARÁ NO PERÍODO DE 2013 À 2016	
<a href="#">Amanda Souza da Silva</a> <a href="#">Rejane Félix Pereira</a> <a href="#">Umberto Sampaio Madeiro Junior</a> <a href="#">Guilherme Geremias Prata</a> <a href="#">Ivandro de Jesus Moreno de Oliveira</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250623</b>	
<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>258</b>
INVESTIGAÇÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA E UTILIZAÇÃO DE PAPEL RECICLADO EM UMA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR EM MINAS GERAIS	
<a href="#">Nandeyara de Oliveira Costa</a> <a href="#">Millena Gabriela Gualberto de Souza</a> <a href="#">Glaucio Luciano de Araújo</a> <a href="#">Marcela Moreira Couto</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250624</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>270</b>
UTILIZAÇÃO DA CINZA RESULTANTE DA INCINERAÇÃO DOS RESÍDUOS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL	
<a href="#">Olaf Graupmann</a> <a href="#">Susan Hatschbach Graupmann</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250625</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>273</b>
PRODUÇÃO DE LUMINÁRIAS A PARTIR DE RESÍDUOS DE MADEIRA	
<a href="#">Ana Luiza Enders Nunes Vieira</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250626</b>	

<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>279</b>
REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL FRESADO EM CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS FLEXÍVEIS	
<p>Marcos Túlio Fernandes  Jouséberon Miguel da Silva  Henrique Lopes Jardim  Alaor Afonso Ramos Soares  Glaucimar Lima Dutra</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250627</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>289</b>
NOVA PROPOSTA DE ANTENA TÊXTIL COM SUBSTRATO BIODEGRADÁVEL PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO	
<p>Matheus Emanuel Tavares Sousa  Humberto Dionísio de Andrade  Samanta Mesquita de Holanda  Idalmir de Souza Queiroz Júnior</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250628</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>296</b>
RISCOS DE INCÊNDIO ASSOCIADOS AO USO DE LÍQUIDOS IÔNICOS EM DIFERENTES PROCESSOS	
<p>Milson dos Santos Barbosa  Isabela Nascimento Souza  Juliana Lisboa Santana  Isabelle Maria Duarte Gonzaga  Lays Carvalho de Almeida  Aline Resende Dória  Luma Mirely Souza Brandão  Débora da Silva Vilar  Priscilla Sayonara de Sousa Brandão</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250629</b>	
<b>CAPÍTULO 30</b> .....	<b>307</b>
CENÁRIO DAS PESQUISAS SOBRE IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DE IMPLANTAÇÃO OU DUPLICAÇÃO DE RODOVIAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA	
<p>Zeferino José Alencar Bezerra  Emerson Acácio Feitosa Santos  João Gomes da Costa  Thiago José Matos Rocha  Aldenir Feitosa dos Santos  Jessé Marques da Silva Júnior Pavão</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250630</b>	
<b>CAPÍTULO 31</b> .....	<b>323</b>
A MECÂNICA DOS AGENTES IMPONDERÁVEIS: UMA PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO PARA AS DISCIPLINAS DE QUÍMICA E MECÂNICA NO ENSINO TÉCNICO	
<p>Maria Lia Scalli Fonseca  Felipe de Lucas Barbosa  José Otavio Baldinato</p>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.29019250631</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>341</b>

## MODELAGEM DE BIORREACTORES EM SÉRIE E COM RECICLO PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO INDUSTRIAL

### **Guilherme Guimaraes Ascendino**

Universidade Federal de São João Del Rei  
(UFSJ), DEQUI  
Ouro Branco - MG

### **Juan Canellas Bosch Neto**

Universidade Federal de São João Del Rei  
(UFSJ), DEQUI  
Ouro Branco - MG

### **Laura de Oliveira Martins Torres**

Universidade Federal de São João Del Rei  
(UFSJ), DEQUI  
Ouro Branco - MG

**RESUMO:** Fatores ambientais, econômicos e políticos têm elevado o interesse das nações pela utilização de etanol como alternativa aos combustíveis fósseis veiculares. Para suprir a demanda mundial, potencializar a produção obtenção de etanol através de modelos matemáticos de simulação e otimização dos processos é altamente desejável. O presente trabalho consistiu em realizar a modelagem computacional de quatro biorreatores contínuos em série para a produção de etanol. Para isso, um estudo de caso industrial real foi realizado, a partir do trabalho de Porto (2005). A revisão bibliográfica abordou a fermentação alcoólica em âmbito industrial e a modelagem computacional do processo fermentativo. A modelagem do estudo de caso foi baseada em balanços de massa, os quais englobam a

cinética do processo fermentativo, obtendo-se um sistema de equações diferenciais não lineares com doze equações que foi resolvido através do software SCILAB. As equações foram resolvidas por método numérico de Runge-Kutta de quarta ordem. Foi escolhido o modelo cinético de Andrietta (2003), o qual considera possíveis inibições pelo substrato, produto e biomassa. Comparou-se os resultados obtidos nesse trabalho com os resultados de Porto (2005) notando que os resultados de Porto (2005) tiveram resultados aquém dos obtidos nesse trabalho. No estudo de caso observou-se a necessidade de inserir correntes extras de substrato nos biorreatores dois, três e quatro de forma a garantir a continuidade do processo de fermentação. Com isso, na simulação, obteve-se um aumento de vinte e dois por cento em termos de produção de etanol comparado ao processo industrial citado por Porto (2005).

**PALAVRAS-CHAVE:** biocombustíveis, biorreatores, fermentação, simulação, Runge-Kutta.

MODELING OF BIOREACTORS IN SERIES  
AND WITH RECYCLE FOR ETHANOL  
PRODUCTION THROUGH AN INDUSTRIAL  
CASE STUDY

## 1 | INTRODUÇÃO

O modelo de industrialização seguido pela humanidade gerou uma dependência global pelos produtos do refino do petróleo. A eminência de escassez e as questões ambientais, econômicas e geopolíticas em torno desse recurso natural não-renovável fomentou, nos últimos anos, o desenvolvimento de processos de obtenção de fontes de energia alternativas e sustentáveis, em especial de biocombustíveis, como o etanol. O Brasil é reconhecido como o país de grande potencial para a produção de biocombustíveis na atualidade, pois é o maior produtor mundial de cana de açúcar e possui experiência de produção e uso de etanol (BORGES, 2011; CONAB, 2018). Entretanto, atualmente, o país enfrenta uma demanda pela inserção de novas tecnologias e práticas de aumento de produtividade. Frente a esse quadro, o desenvolvimento de modelos matemáticos apropriados que possibilitem a simulação, otimização e implementação nos processos é altamente desejável (BUENO, 2006).

Os biocombustíveis têm se tornado uma importante fonte de energia alternativa, principalmente aqueles com capacidade de substituir, em parte, os combustíveis veiculares. Os biocombustíveis são produzidos a partir de fontes renováveis (biomassa), seja esta produzida especificamente com esse propósito, nos chamados cultivos energéticos – “Biocombustíveis de primeira geração” – ou obtida a partir de resíduos orgânicos de algum processo, caracterizando-a biomassa residual – “Biocombustíveis de segunda geração” (CINELLI, 2012).

No Brasil, a indústria sucroenergética já é de grande importância para a economia nacional, sendo o etanol produzido a partir da fermentação alcoólica de mosto derivado de cana-de-açúcar a principal forma de produção do país. Ele pode ser utilizado como combustível nos veículos flex fuel (hidratado), misturado com a gasolina, com o objetivo de baratear o combustível, aumentar sua octanagem e reduzir a emissão de poluentes (anidro), além da utilização na fabricação de tintas, vernizes e solventes (CONAB, 2016).

A implantação e desenvolvimento da produção de álcool combustível em larga escala no Brasil trouxeram a oportunidade e a necessidade de um grande desenvolvimento tecnológico. A produção de etanol a partir matérias primas solúveis ocorre por meio da fermentação alcoólica dos açúcares presentes por leveduras. Para produzir etanol, a fermentação é um dos principais parâmetros a ser controlado (RIBEIRO *et al.*, 2015).

Dentre os diversos aspectos relacionados com o processo de fermentação alcoólica, os estudos de modelagem cinética do processo fermentativo têm merecido especial atenção. A presença de modelos do processo torna a atuação dos profissionais que atuam na área engenharia de processos mais assertiva, aumentando a competitividade das plantas comerciais. A representação dos processos através de equações matemáticas é conhecida como modelagem de processo. A complexidade dos modelos matemáticos encontrados dependerá do quanto eles se aproximam

da realidade (BURDEN; FAIRES, 2010). A modelagem e simulação de processos é uma ferramenta bastante utilizada devido à possibilidade que oferece em simular equipamentos e alterar variáveis de processo, avaliando o seu desempenho sem interferir no sistema operante (SILVA, 2012). Nos processos fermentativos, modelos cinéticos clássicos considerando efeitos inibitórios do substrato e do produto têm sido propostos e utilizados na simulação (DARÉ, 2009).

## 2 | OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo modelar e simular uma unidade fermentativa industrial para a produção de etanol constituída de quatro biorreatores contínuos em série com corrente de reciclo, bem como estudar essa configuração em comparação a um estudo de caso de uma indústria de álcool.

## 3 | REFERENCIAL TEÓRICO

A utilização em larga escala do álcool combustível oferece um exemplo prático de desenvolvimento sustentável ao combinar contribuição à melhoria do meio ambiente, exploração de vocações econômicas locais e geração de emprego e renda nas zonas de plantio/produção, descentralizando dos grandes centros urbanos (DEIMLING; BORILLI, 2005).

Ante a pluralidade dos combustíveis, destaca-se o etanol ( $C_2H_5OH$ ). Este álcool é um composto orgânico, incolor, volátil, inflamável e totalmente solúvel em água, sendo utilizado mundialmente como combustível automotivo devido a seu elevado índice de octano (108) e bom teor de oxigênio (35%), o que atribui uma rápida e limpa combustão quando comparado à gasolina (SILVA, 2012). Além disso, ele pode ser obtido de três formas: por destilação de líquidos alcoólicos como a cerveja; por via sintética, a partir da hidratação do etileno e etino ou a partir de gases de petróleo e hulha; e por via fermentativa através da fermentação de açúcares (glicose, sacarose e frutose) sob condições anaeróbias (SOUSA, 2016).

A fermentação (catabolismo anaeróbico) é um processo metabólico pelo qual se forma etanol,  $CO_2$  e outros subprodutos através da transformação de substratos orgânicos (que contêm açúcares), pela ação de microrganismos ou enzimas. Basicamente, a fermentação alcoólica é uma das vias de um processo fermentativo, onde há a produção de álcool etílico e desprendimento de gás carbônico no processo.

Industrialmente, os processos de fermentação alcoólica chegam a 96% de rendimento estequiométrico, e podem ocorrer em três formas diferentes: processo em batelada simples, em batelada alimentada (Melle-Boinot) e contínuo. O processo mais simples empregado é em batelada. É um processo bastante lento (quando comparado a um contínuo), em que se gasta bastante tempo inclusive na limpeza do

reator. É um processo descontínuo em que se utiliza um novo inóculo a cada batelada realizada (GOMEZ, 2011). Diversos estudos são encontrados na literatura acerca do tipo de fermentador utilizado na produção de etanol, abrigando processos em batelada (alimentada) ou contínuos. Muitas vezes, nota-se a utilização de reatores em série como forma de otimizar o rendimento do processo.

O estudo da cinética de um processo fermentativo é imprescindível para se obter um conhecimento sobre quais fatores afetariam a velocidade de uma reação química, podendo ser correlacionados por meio de equações matemáticas e se determinados, permitem ações de otimização do processo (COPERSUCAR, 1987).

Considerando as variáveis de substrato (S), concentração de microrganismos (X) e concentração de produto (P) presente no meio ao longo de um determinado tempo t é possível determinar as velocidades de transformações instantâneas (DARÉ, 2009), representadas pelas Equações 1, 2 e 3.

$r_x = \frac{dX}{dt}$	(1)
$r_s = -\frac{dS}{dt}$	(2)
$r_p = \frac{dP}{dt}$	(3)

Onde  $r_x$ ,  $r_s$  e  $r_p$  correspondem às velocidades instantâneas de microrganismos, substrato e produto, respectivamente.

Segundo Daré (2009), o estudo da cinética dos processos fermentativos exige o conhecimento e a utilização de parâmetros que possibilitem a análise da produção de células e produção da substância desejada, como o etanol. Entre estes parâmetros encontram-se a velocidade específica de crescimento celular ( $\mu_x$  ou simplesmente  $\mu$ ), a velocidade específica de consumo de substrato (e a velocidade específica de formação de produto ( $\mu_p$ ), que se relacionam com as respectivas velocidades instantâneas pelas Equações 4, 5 e 6.

$\mu_x = \mu = \frac{r_x}{X}$	(4)
$\mu_x = \mu = \frac{r_x}{X}$	(5)
$\mu_p = \frac{r_p}{P}$	(6)

Onde X, S e P correspondem às concentrações finais de microrganismos, substrato e produto, respectivamente.

O rendimento celular e o rendimento do produto em relação a um substrato S

no meio é definido pelas Equações 7 e 8, respectivamente (KATOH, HORIUCHI e YOSHIDA, 2015).

$Y_{X/S} = \frac{X_{final} - X_0}{S_0 - S_{final}}$	(7)
$Y_{X/S} = \frac{X_{final} - X_0}{S_0 - S_{final}}$	(8)

Onde  $Y_{X/S}$  e  $Y_{X/s}$  correspondem aos rendimentos em células e em produto, respectivamente, em relação a quantidade de substrato consumida.  $X_0$ ,  $S_0$  e  $P_0$  são as concentrações iniciais de células, substrato e produto, respectivamente e  $X_{final}$ ,  $S_{final}$  e  $P_{final}$  são as concentrações finais dos mesmos componentes.

Segundo Elnashaie e Garhyan (2003), os rendimentos bioquímicos substituem os números estequiométricos utilizados nas reações químicas. Portanto, as equações de taxa para cada componente se relacionam pela equação 9 (LEVENSPIEL, 2000).

$Y_{X/S} = \frac{X_{final} - X_0}{S_0 - S_{final}}$	(9)
---	-----

Cada modelo cinético descreve o crescimento microbiano para uma levedura específica, em condições experimentais diferentes. Alguns deles com aproximação convencional baseada na cinética de Michaelis-Menten possuem constantes cinéticas com valores específicos apresentados pelos seus autores, de acordo com os experimentos feitos por eles. Dentre tais modelos, destaca-se o de Andrietta *et al.* (2003), indicado pela equação 10.

$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \left( \frac{S}{k_s + S + \frac{S^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P}{P_{m\acute{a}x}} \right)^n \left( 1 - \frac{X}{X_{m\acute{a}x}} \right)^m$	(10)
--	------

Os valores das constantes cinéticas do supracitado modelo desenvolvido, adaptadas de Porto (2005), estão dispostos na tabela 1.

$k_s$	$\mu_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{a}x}$	$X_{m\acute{a}x}$	n	m	$k_i$
5	0.45	93	90	2	1,4	42

Tabela 1. Parâmetros cinéticos do modelo apresentado na Equação 10.

A modelagem matemática de processos fermentativos pode ser definida como a tentativa de representar os balanços de massa para cada componente do biorreator associados às complexas reações bioquímicas que ocorrem nos processos e às velocidades com que estas se processam (LIMA *et al.*, 2001). Sistemas de fermentação são altamente sensíveis às mudanças anormais em condições operacionais. Para assegurar que o máximo rendimento possível de produto seja obtido é necessário garantir que as condições dentro do fermentador permaneçam essencialmente programadas ao redor de uma trajetória pré-especificada e que o sistema mantenha-se operando suavemente. Uma fermentação livre de maiores transtornos é seguramente mais produtiva que uma sujeita a perturbações significativas (LENNOX *et al.*, 2000; BOREATO, 2012).

As equações de balanço do processo devem ser formuladas para cada variável de estado e para o volume de controle do sistema em estudo. A simulação de modelos normalmente envolve a resolução de equações diferenciais do tipo  $x = f(x,t)$ , sendo que métodos numéricos são utilizados para a resolver a equação diferencial (AGUIRRE, 2004). Dentre os métodos numéricos, os de Runge-Kutta são muito utilizados para a integração de sistemas de equações diferenciais ordinárias devido sua simplicidade, alta precisão e versatilidade de aplicações (CUNHA, 2003).

#### 4 | MATERIAIS E MÉTODOS

Porto (2005), estudou uma usina de álcool e os parâmetros utilizados em seu processo fermentativo. A usina possuía quatro biorreatores em série, sendo o volume deles 601,8 m<sup>3</sup>, 413,8 m<sup>3</sup>, 331,8 m<sup>3</sup> e 262,1 m<sup>3</sup>, consecutivamente. A configuração da planta está explicitada na Figura 1.

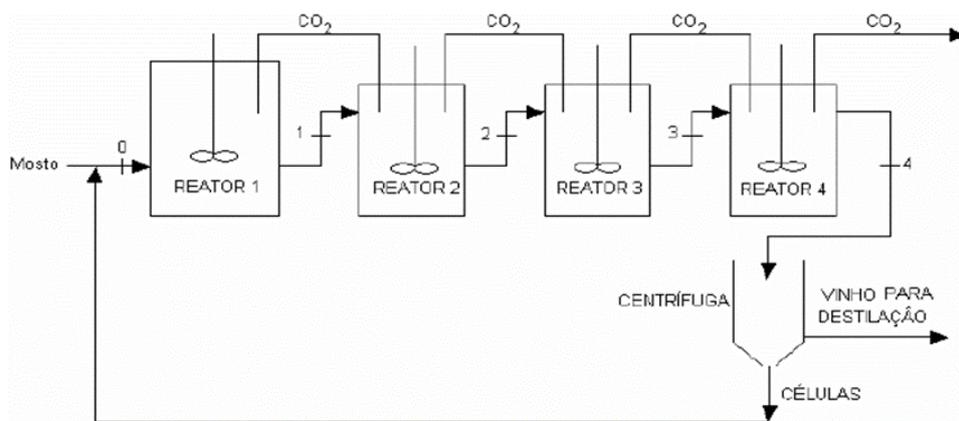


Figura 1. Esquema da etapa de fermentação (PORTO, 2005).

Durante o período de julho/2002 a agosto/2002, Porto (2005) coletou todos os parâmetros necessários para realizar a simulação do processo através do software Delphi 7.0, tais como vazão do mosto, vazão de reciclo, ART do mosto e rendimentos,

mostrados nas Tabelas 2 e 3.

	Substrato (g L <sup>-1</sup> )	Células (g L <sup>-1</sup> )	Etanol (g L <sup>-1</sup> )
<b>Biorreator 1</b>	31,999	39,979	40,810
<b>Biorreator 2</b>	9,585	45,719	51,120
<b>Biorreator 3</b>	5,959	41,557	52,788
<b>Biorreator 4</b>	5,085	50,024	53,190

Tabela 2. Concentrações dos componentes ART, etanol e células nos biorreatores e volume dos biorreatores durante o ensaio de julho de 2002 na usina de álcool.

	Substrato (g L <sup>-1</sup> )	Células (g L <sup>-1</sup> )	Etanol (g L <sup>-1</sup> )
<b>Biorreator 1</b>	33,596	52,831	55,048
<b>Biorreator 2</b>	9,373	43,077	66,191
<b>Biorreator 3</b>	6,189	43,279	67,655
<b>Biorreator 4</b>	4,785	45,826	68,301

Tabela 3. Concentrações dos componentes ART, etanol e células nos biorreatores e volume dos biorreatores durante o ensaio de agosto de 2002 na usina de álcool.

Os valores simulados para o processo por Porto (2005) se assemelharam aos dados reais coletados em campo, o que demonstra a representatividade do modelo de equação da cinética de fermentação adotado.

Analisando os valores, nota-se que não há produção significativa de etanol que justifique a utilização de quatro biorreatores em série, visto que após o segundo biorreator não mais se nota uma grande conversão em produto. Tendo em vista os resultados encontrados por Porto (2005), uma modelagem se faz necessária a fim de se garantir um melhor aproveitamento da planta química e, conseqüentemente, uma maior produção de etanol ao fim do processo, tornando assim a utilização de quatro biorreatores mais vantajosa.

A modelagem proposta neste trabalho, diferente de Porto (2005), possui a configuração mostrada na Figura 2. As correntes adicionais de mosto que alimentam o segundo, terceiro e quarto biorreatores possibilitam a continuidade do processo fermentativo pela disponibilidade de substrato para o metabolismo celular e, conseqüentemente, promovem um aumento da produção de etanol.

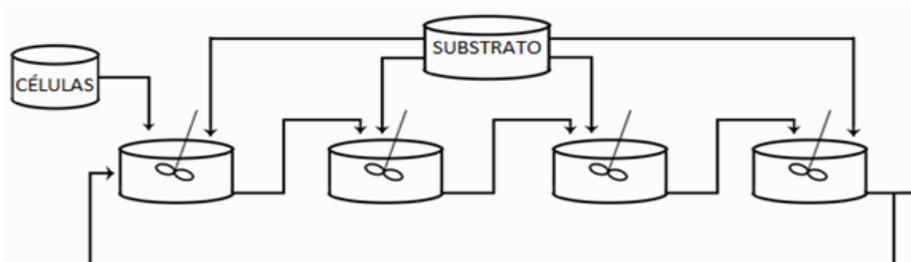


Figura 2. Esquema de quatro biorreatores contínuos em série e suas respectivas correntes dos componentes de interesse - substrato, células e produto (Elaborado pelos autores).

Cada um dos quatro biorreatores possui um volume diferente, sendo os volumes reais da planta, encontrados na tese de Porto (2005). A modelagem do processo de obtenção de etanol foi realizada sob a condição de regime permanente (estado estacionário). Além disso, há uma corrente de reciclo que sai do quarto reator e retorna ao primeiro e, sendo que a composição do mosto não apresenta etanol. A Equação 11 representa o balanço de massa global e os balanços de células, substrato e produto são dados pelas Equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$F_{i-1} - F_i = 0$	(11)
$X_{i-1}F_{i-1} - X_iF_i - \mu_iX_iV_i = 0$	(12)
$S_{i-1}F_{i-1} - S_iF_i - \frac{1}{Y_{X/S}}\mu_iX_iV_i = 0$	(13)
$P_{i-1}F_{i-1} - P_iF_i - \frac{Y_{P/S}}{Y_{X/S}}\mu_iX_iV_i = 0$	(14)

As equações que descrevem os balanços de massa englobam fatores que dizem respeito à cinética das reações. A escolha de um modelo que descreve, idealmente, a cinética da reação de produção de etanol é fundamental para a obtenção de resultados fidedignos à literatura. Sendo assim, o modelo cinético escolhido para o processo foi o de Andrietta *et al.* (2003), que considera efeitos de inibição pelo produto, pelo substrato e pela biomassa presente.

A modelagem matemática dos componentes de interesse dos quatro biorreatores contínuos em série foi expressa pelas Equações 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26. O sistema de 12 EDO's resultante é não-linear e não tem solução analítica, sendo integrado numericamente por meio do método de Runge-Kutta de quarta ordem, utilizando o software SCILAB.

- Primeiro Biorreator:

Balanço de massa para células

$X_0F_c + X_4F_r - [X_1(F_c + F_r)] - \mu_{\max} \left( \frac{S_1}{k_s + S_1 + \frac{S_1^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_1}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_1}{X_{\max}} \right)^m X_1V_1 = 0$	(15)
---	------

Balanço de massa para substrato

$X_0 F_c + X_4 F_r - [X_1(F_c + F_r)] - \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_1}{k_s + S_1 + \frac{S_1^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_1}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_1}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_1 V_1 = 0$	(16)
--	------

Balanço de massa para etanol

$P_0 F_p + P_4 F_r - P_1(F_p + F_r) + \left( \frac{Y_P}{Y_X S} \right) \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_1}{k_s + S_1 + \frac{S_1^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_1}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_1}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_1 V_1 = 0$	(17)
---	------

- Segundo Biorreator:

Balanço de massa para células

$[X_1(F_c + F_r)] - [X_2(F_c + F_r)] + \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_2}{k_s + S_2 + \frac{S_2^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_2}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_2}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_2 V_2 = 0$	(18)
---	------

Balanço de massa para substrato

$S F_z + S_2(F_s + F_r) - S_3(F_s + F_r + F_z) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_2}{k_s + S_2 + \frac{S_2^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_2}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_2}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_2 V_2 = 0$	(19)
---	------

Balanço de massa para etanol

$P_1(F_p + F_r) - P_2(F_p + F_r) + \left( \frac{Y_P}{Y_X S} \right) \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_2}{k_s + S_2 + \frac{S_2^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_2}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_2}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_2 V_2 = 0$	(20)
--	------

- Terceiro Biorreator:

Balanço de massa para células

$[X_2(F_c + F_r)] - [X_3(F_c + F_r)] + \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S_3}{k_s + S_3 + \frac{S_3^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_3}{P_{\text{máx}}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_3}{X_{\text{máx}}} \right)^m X_3 V_3 = 0$	(21)
---	------

Balanço de massa para substrato

$SF_z + S_2(F_s + F_r + F_z) - S_3(F_s + F_r + 2F_z) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu_{\max} \left( \frac{S_3}{k_s + S_3 + \frac{S_3^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_3}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_3}{X_{\max}} \right)^m X_3 V_3 = 0 \quad (22)$	
--	--

Balanço de massa para etanol

$P_2(F_p + F_r) - P_3(F_p + F_r) + \left( \frac{Y_P}{Y_X \bar{S}} \right) \mu_{\max} \left( \frac{S_3}{k_s + S_3 + \frac{S_3^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_3}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_3}{X_{\max}} \right)^m X_3 V_3 = 0 \quad (23)$	
---	--

- Quarto Biorreator:

Balanço de massa para células

$[X_3(F_c + F_r)] - [X_4(F_c + F_r)] + \mu_{\max} \left( \frac{S_4}{k_s + S_4 + \frac{S_4^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_4}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_4}{X_{\max}} \right)^m X_4 V_4 = 0 \quad (24)$	
--	--

Balanço de massa para substrato

$SF_z + S_3(F_s + F_r + 2F_z) - S_4(F_s + F_r + 3F_z) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu_{\max} \left( \frac{S_4}{k_s + S_4 + \frac{S_4^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_4}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_4}{X_{\max}} \right)^m X_4 V_4 = 0 \quad (25)$	
---	--

Balanço de massa para etanol

$P_3(F_p + F_r) - P_4(F_p + F_r) + \left( \frac{Y_P}{Y_X \bar{S}} \right) \mu_{\max} \left( \frac{S_4}{k_s + S_4 + \frac{S_4^2}{k_i}} \right) \left( 1 - \frac{P_4}{P_{\max}} \right)^n \left( 1 - \frac{X_4}{X_{\max}} \right)^m X_4 V_4 = 0 \quad (26)$	
---	--

Onde  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  representam as concentrações de células,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  as concentrações de substrato e  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  as concentrações de produto nos quatro biorreatores, respectivamente, corresponde ao fator de conversão de substrato em células e o fator de conversão de substrato em etanol. Os parâmetros  $\mu_{\max}$ ,  $K_s$ ,  $P_{\max}$  e  $X_{\max}$  são constantes definidas por Andrietta *et al.* (2003),  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$  são os volumes dos biorreatores e vazão volumétrica,  $F_s$ ,  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_r$  e  $F_z$  são as vazões de substrato inicial, células, produto, reciclo e substrato adicional respectivamente.

A modelagem foi aplicada a condições de operação de uma indústria real, sendo que o rendimento em produto e o rendimento em células foram considerados de Porto (2005), assim como os volumes dos quatro biorreatores, sendo de 514,0 m<sup>3</sup>,

572,0 m<sup>3</sup>, 298,0 m<sup>3</sup> e 235,0 m<sup>3</sup> respectivamente. Os valores dos parâmetros cinéticos estão contidos na tabela 4.

Parâmetros	Valor
$\mu_{\text{máx}}$	0,450 h <sup>-1</sup>
$k_S$	5,000 g L <sup>-1</sup>
$P_{\text{máx}}$	93,000 g L <sup>-1</sup>
$X_{\text{máx}}$	90,000 g L <sup>-1</sup>
N	2,000
m	1,400
$Y_{X/S}$	0,026
$Y_{X/S}$	0,418

Tabela 4. Valores dos parâmetros cinéticos do modelo de Andrietta et al. (2003) e rendimentos de células e produto.

Os parâmetros operacionais da indústria foram ajustados na simulação realizada neste trabalho de modo que os dois últimos biorreatores apresentassem rendimentos satisfatórios. Dessa forma, simulou-se diferentes vazões e concentrações de alimentação de substrato e células, bem como as correntes adicionais de substrato e o reciclo a fim de se obter maior produção de etanol em um tempo viável de processo. Os valores ajustados são:  $F_s$ ,  $F_c$  e  $F_p$  de 35,0 m<sup>3</sup>/h;  $F_r$  de 40,0 m<sup>3</sup>/h;  $F_z$  de 10,0 m<sup>3</sup>/h;  $S_0$  e  $S$  de 130,0 g/L;  $X_0$  de 15,0 g/L e  $P_0$  como nula.

A partir do valor de 150 de substrato, ocorre um efeito inibidor na fermentação. Sendo assim, estipulou-se o valor de 130,0 para ser usado no processo. Avaliou-se na literatura que, em escala industrial, 13,0 de leveduras do tipo *Saccharomyces cerevisiae* é suficiente para iniciar o processo de fermentação em tempo viável (ZANARDI *et al.*, 2014). A concentração de etanol na corrente de alimentação foi considerada nula.

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados a partir da simulação da unidade fermentativa composta por quatro biorreatores ligados em série com reciclo e alimentações adicionais de substrato no segundo, terceiro e quarto estão mostrados nas Figuras 3, 4 e 5.

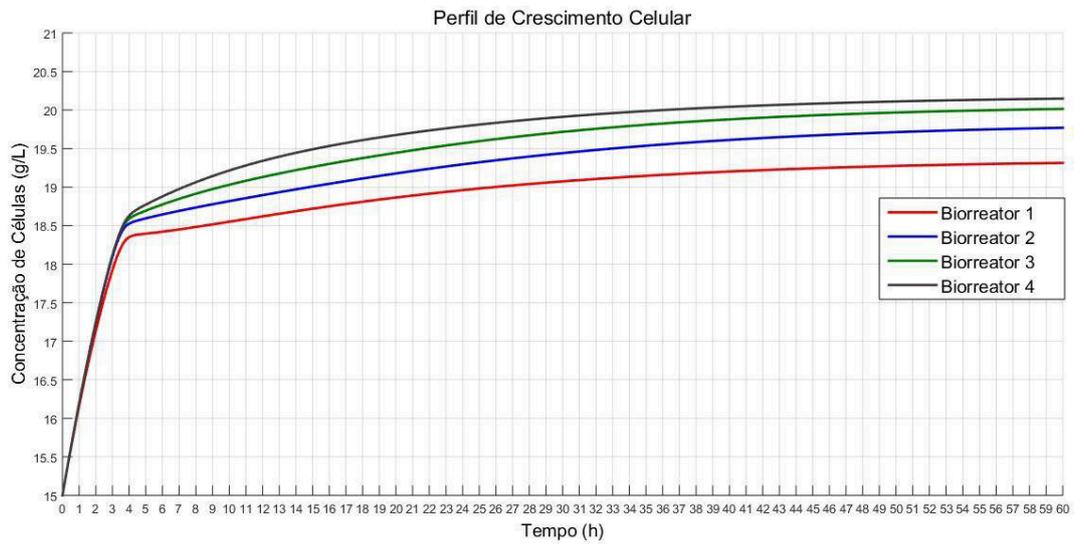


Figura 3. Perfil de crescimento celular simulado para a planta com quatro biorreatores em série.

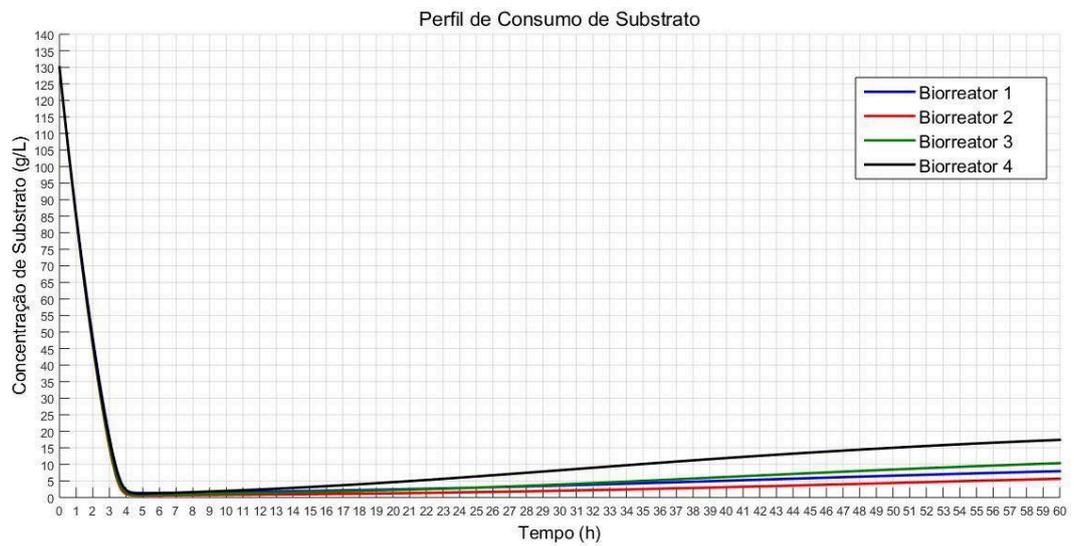


Figura 4. Perfil de consumo de substrato simulado para a planta com quatro biorreatores em série.

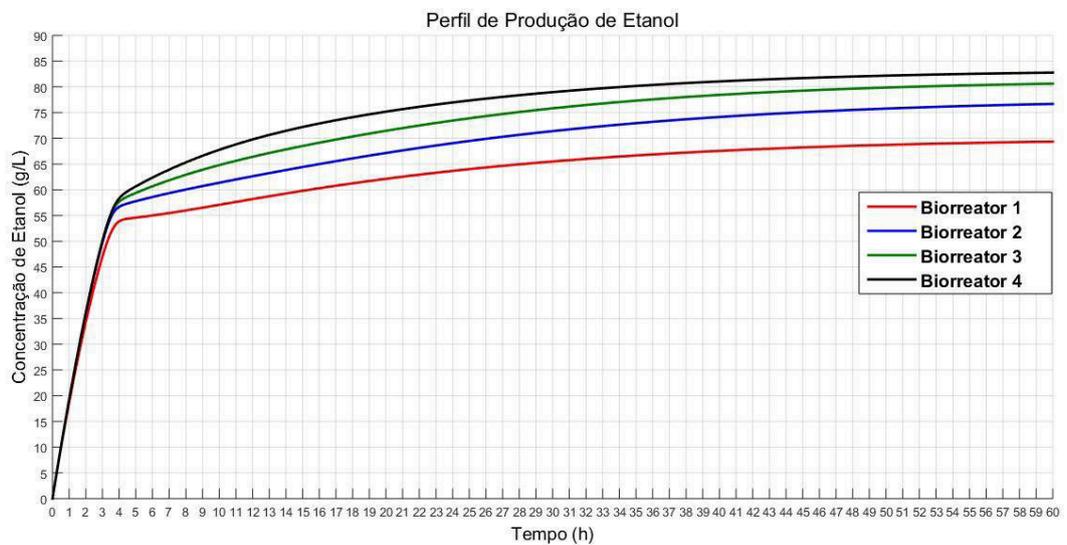


Figura 5. Perfil de produção de etanol simulado para a planta com quatro biorreatores em série.

Como esperado para o comportamento da fermentação alcoólica, a relação cinética entre crescimento e formação de produto depende do consumo de substrato. Além disso, observa-se que o distanciamento entre as curvas de produção de etanol de cada biorreator demonstra que a utilização de todos os biorreatores é justificável, visto que há um aumento de rendimento e produção de etanol.

A modelagem realizada para o processo contínuo considera o tempo que o processo leva para atingir o estado estacionário. Essa condição pode ser observada nas Figuras 3, 4 e 5 pelo período em que a concentração de células e etanol esboça um perfil ascendente, e a concentração de substrato um perfil descendente. A partir do momento em que se atinge o estado estacionário, em aproximadamente 30 horas, observa-se o perfil de concentração do produto tendendo a linearidade.

Quando o processo começa a operar em regime permanente, as concentrações de células, substrato e etanol na saída dos biorreatores passam a se comportar conforme mostrado na Tabela 5.

	<b>Substrato (g L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Células (g L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Etanol (g L<sup>-1</sup>)</b>
<b>Biorreator 1</b>	11,465	19,358	70,071
<b>Biorreator 2</b>	9,213	19,836	77,743
<b>Biorreator 3</b>	14,938	20,066	81,444
<b>Biorreator 4</b>	22,567	20,187	83,391

Tabela 5. Concentrações de saída nos biorreatores em série.

A velocidade de crescimento celular decresce do primeiro ao último biorreator, possivelmente devido ao acúmulo do etanol e substrato, atuando como compostos inibidores. As células passam por uma transição até que a velocidade de crescimento seja zero, passando à fase estacionária. Esse efeito também é considerado no modelo de Andrietta *et al.* (2003), mostrando que a cinética aplicada foi satisfatória para representar o crescimento microbiano.

A concentração de substrato na corrente de saída é maior no último biorreator. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de que a atividade celular diminui ao longo dos biorreatores e, conseqüentemente, o consumo do mesmo. Para obter uma alta taxa de produção de etanol, foi necessário manter a saída de substrato residual do processo. Entretanto, as indústrias podem optar pela recuperação do mesmo através da instalação de centrífugas.

Comparando-se os dados de processo para a concentração de células, substrato e etanol produzido na planta da indústria e os resultados simulados da planta proposta neste trabalho, pode-se verificar um aumento de 22,09% na geração de etanol, conforme observado na Figura 6.

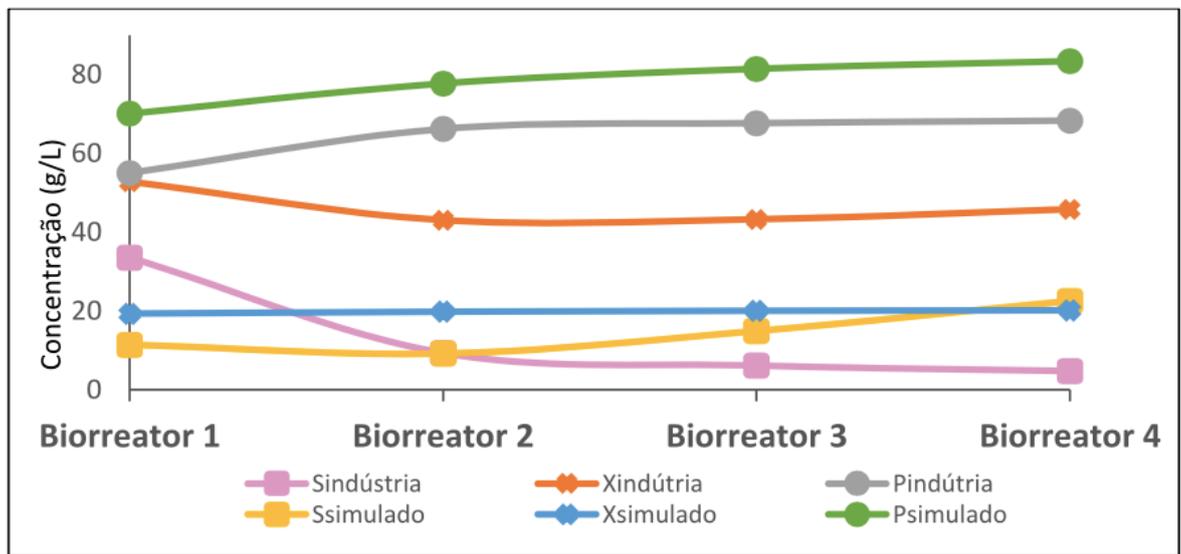


Figura 6. Comparação entre dados de processo da indústria e resultados da simulação obtidos para a planta proposta.

Como observado no estudo de caso, grande parte de substrato no processo industrial é quase em sua totalidade consumida no primeiro biorreator, fazendo com que a produção de etanol no terceiro e, principalmente, quarto biorreator sejam insatisfatórias. Na planta proposta, as alimentações adicionais de substrato, mantém concentrações de substrato disponíveis no sistema, possibilitando a continuidade do processo fermentativo e aumentando a produção de etanol.

## 6 | CONCLUSÃO

A modelagem e simulação de processos são ótimas ferramentas para a obtenção de parâmetros desejáveis em uma indústria tanto na etapa de projeto, quanto no estudo de melhorias do processo como realizado neste trabalho. A estratégia de simulação desenvolvida no SCILAB se apresentou bem definida, constituindo assim uma metodologia representativa para a avaliação do processo de fermentação alcoólica em biorreatores contínuos. Após a análise dos resultados encontrados, observa-se que o sistema de biorreatores associados em série com reciclo e correntes adicionais de substrato proporcionou um aumento de 22% na produção de etanol comparado ao sistema empregado pela usina estudada como referência neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares a sistemas reais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 659., 2004.

ANDRIETTA; S. R.; FERREIRA, E., ANDRIETTA, M. G. Avaliação da influência da velocidade de alimentação sobre o rendimento e produtividade dos processos de produção de etanol operando em batelada alimentada. Anais do Sinaferm 2003. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 7 p., 2003.

BOARETO, A. J. B. M. Modelagem matemática hídrica cibernética neuronal do processo contínuo de produção de etanol por *Zymomonas mobilis*. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 251 p., 2012.

BORGES, P. C. S. Otimização dinâmica da fermentação alcoólica no processo em batelada alimentada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 141 p., 2008.

BUENO, T. Modelagem, simulação e controle de bioprocessos: Uma abordagem introdutória. Curitiba, 24 p., 2016.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. Numerical Analysis. 9. ed. Boston, Massachusetts: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2010.

CINELLI, B. A. Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química. Rio de Janeiro, 125 p., 2012.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana, v. 2 - Safra 2015/16, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-76, abril 2016. Disponível em [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 20 de junho de 2018.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana, v. 3 - Safra 2016/17, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília, p. 1-72, agosto 2016. Disponível em [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em: 20 de junho de 2017.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de controle químico da fabricação de açúcar. Piracicaba: Copersucar, p. 1-51, 1987.

DARÉ, R. M. Avaliação de coeficientes de rendimento e modelagem do processo fermentativo de produção de etanol. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, UFSCar. São Carlos, 67 p., 2009.

DEIMLING, L. C.; BORILLI, S. P. Nível de Satisfação do Proprietário de Veículo Bicomustível no Município de Cascavel/PR: Uma Análise Exploratória. In: Shikida, Pery Francisco Assis; Staduto, Jefferson Andronio Ramundo (Org.). Agroindústria Canavieira no Paraná: Análises, Discussões e Tendências. Cascavel: Editora Coluna do Saber, p. 93-109, 2005.

GOMEZ, P. A. A. Simulação de Diferentes Alternativas de Arranjo de Uma Unidade de Fermentação Piloto Móvel para a Produção de Etanol. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP, Campinas (SP), 83 p., 2011.

KATOH, S.; HORIUCHI, J.; YOSHIDA, F. Biochemical engineering: a textbook for engineers, chemists and biologists. 2 ed. Weinheim: John Wiley & Sons, 258 p., 2015.

LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

LENNOX, B.; HIDDEN, H. G.; MONTAGUE, G. A.; KORNFELD, P. R.; GOULDING, P. R. Application of multivariate statistical process control to batch operations. Computers and Chemical Engineering, 24, p. 291–296, 2000.

LIMA, U. A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. In: LIMA, U. A. Biotecnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos. Biotecnologia Industrial; v. 3, São Paulo: Edgard Blücher, p. 1-43, 2001.

PORTO, L. M. Modelagem de processo industrial de fermentação alcoólica contínua com reatores

de mistura ligados em série. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 139 p., 2005.

RIBEIRO, C. B.; BURATTO, W. G.; GUERI, M. V. D.; SCABURI, G. R.; GONZELI, F. V.; Fermentação alcoólica do caldo de cana: parâmetros operacionais de resposta no processo. R. gest. sust. ambient., Florianópolis, n. esp, p.465-472, dez. 2015.

SILVA, J. L. Modelagem e simulação de reatores autoclave para produção de PEBD. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOUSA, G. S. Estudo da fermentação alcoólica em um biorreator de leito fixo em sistema contínuo com células de *Saccharomyces cerevisiae* imobilizadas em alginato cálcio revestido com quitosana. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química – Unicamp, Campinas (SP), p. 142, 2016.

ZANARDI, M. S.; GOMES, I. A.; COSTA Jr., E. F. Modelagem fenomenológica de biorreator industrial para a produção de etanol. In: Anais do V Encontro Científico de Física Aplicada [= Blucher Physics Proceedings, n.1, v.1]. São Paulo: Blucher, p. 93-109, 2014.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-429-0

