



# 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>

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

### Welban Ricardo Ursino

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

### Samuel Conceição Oliveira

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

**RESUMO:** Neste capítulo, avaliou-se a influência da pressão e da temperatura do vapor bem como a implementação de aquecedores regenerativos na eficiência térmica de ciclos de cogeração de bioenergia no setor sucroenergético. Para tanto, foram realizadas simulações matemáticas dos ciclos operando em condições de pressão e temperatura do vapor comumente utilizadas no setor (pressão de 67 bar, em temperaturas de 490 e 520°C e pressão de 100 bar, em temperaturas de 520 e 540°C) e temperatura da água de alimentação da caldeira variando entre 120 e 180°C, em incrementos de 20°C, sendo essas temperaturas atingidas usando-se pré-aquecedores regenerativos. As simulações foram baseadas em equações de balanço de massa e energia aplicadas ao sistema,

as quais foram resolvidas empregando-se o software *Cycle-Tempo*. Os resultados obtidos nas simulações confirmaram o ganho energético esperado com a implementação de pré-aquecedores regenerativos de alta pressão em ciclos de potência a vapor, representando uma alternativa viável para um melhor aproveitamento energético da biomassa residual (bagaço) gerada no processo de produção de açúcar e álcool.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bioenergia, Cana-de-açúcar, Cogeração, Ciclo Regenerativo

**ABSTRACT:** In this chapter, it was evaluated the influence of pressure, temperature and the introduction of regenerative heaters in the thermal efficiency of bioenergy cogeneration cycles in the sugarcane industry. Thereunto, some mathematical simulations of the cycles were done, operating in pressure and steam temperature conditions commonly used in the industry (67 bar of pressure under temperatures of 490 and 520 °C, and 100 bar of pressure at 520 and 540°C of temperature) and the boiler's water feed temperature varying between 120 and 180 °C with temperature increments of 20 °C, these being the reached temperatures by using regenerative preheaters. The simulations were based on mass and energy conservation equations applied to the system, which were solved by using the Cycle-Time software.

The obtained results in the simulations confirmed the expected energy gain with the implementation of the high pressure regenerative preheaters in steam power cycles, representing a feasible alternative for a better energy use of residual biomass (sugar cane bagasse) generated in production processes of sugar and alcohol.

**KEYWORDS:** Bioenergy, Sugarcane, Cogeneration, Regenerative Cycle

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo Walter (1994), cogeração é um termo técnico usado para designar os processos de produção de energia combinada de calor e potência pelo uso da energia fornecida por uma fonte (combustíveis), independentemente do ciclo termodinâmico empregado. A cogeração no setor sucroenergético justifica-se pela grande quantidade de bagaço de cana gerada no processo de produção de açúcar e álcool, possibilitando a autossuficiência energética do setor (PELLEGRINI, 2009).

Em 2016, 35,2 TW.h de energia foram gerados a partir de bagaço de cana (incluindo o autoconsumo), sendo 21,2 TW.h exportado para o Sistema Integrado Nacional de Energia (SIN), o que representa cerca de 72% de toda a energia produzida por meio de biomassa e 5,7% da oferta interna de energia elétrica (OIEE) brasileira (619,7 TW.h).

Das cerca de 378 usinas existentes no Brasil somente 200 unidades comercializam energia elétrica, o que caracteriza a baixa eficiência ou inexistência de cogeração. Este cenário aponta para o enorme potencial energético que pode vir a ser explorado no Brasil pela utilização do biocombustível bagaço de cana.

É sabido que historicamente não se desenvolveu o hábito de avaliar a eficiência térmica de plantas de cogeração utilizando critérios racionais de engenharia tais como aqueles baseados em princípios de conservação de massa e energia. Esse comportamento deve-se ao fato de que, no passado, o bagaço era considerado um resíduo de pouco valor agregado, o que demandava a sua imediata eliminação dado o considerável volume de material que era gerado no processo, fazendo da queima a solução mais rápida e fácil para o problema.

Em ciclos de potência a vapor para cogeração, a energia térmica (calor) é comumente fornecida na forma de vapor para o processo industrial. A Figura 1 ilustra os principais fluxos de entrada e saída em um sistema de cogeração com fornecimento de vapor (calor) a determinado processo.

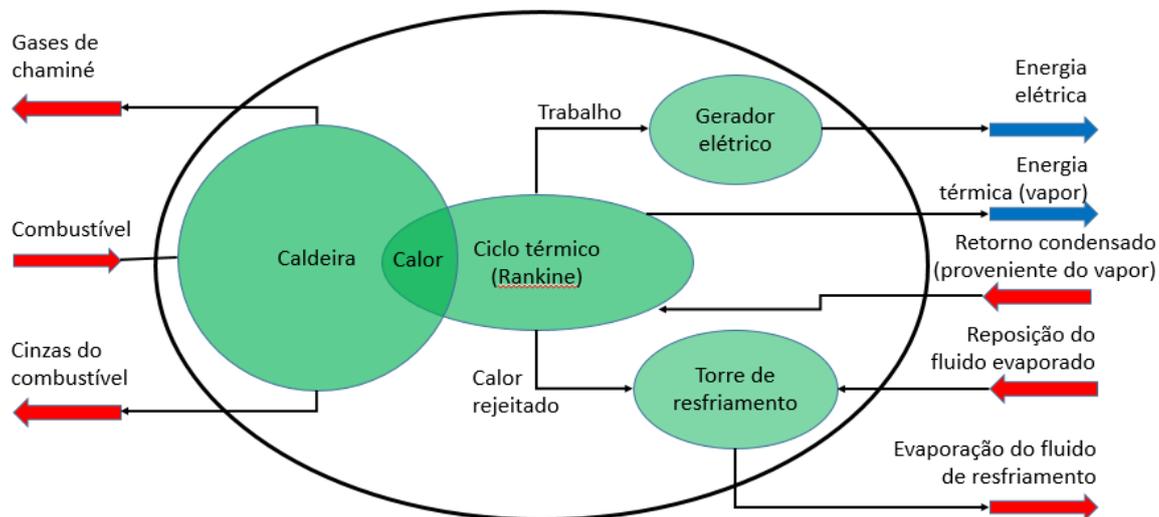


Figura 1 - Representação simplificada de um volume de controle referente a um sistema de potência a vapor utilizado para cogeração de energia em uma planta do setor sucroenergético

Considerando os fluxos de energia que entram e saem do volume de controle do sistema de cogeração termelétrica esquematizado na Figura 1, tem-se:

$$\dot{Q}_e = \dot{W}_{elet} + \Delta\dot{Q}_g + \Delta\dot{Q}_t + \Delta\dot{Q}_{cond} + \Delta\dot{Q}_{tub} + \Delta\dot{Q}_{cald} + \dot{Q}_{vap\ processo} - \dot{Q}_{cond}$$

onde:

$\dot{Q}_e$  – fluxo de calor correspondente à energia liberada pela queima do combustível na fornalha da caldeira (kW);

$\dot{W}_{elet}$  – potência elétrica produzida pelo gerador (kW);

$\Delta\dot{Q}_g$  – perda de potência no gerador elétrico (kW);

$\Delta\dot{Q}_t = \Delta\dot{Q}_{int} - \Delta\dot{Q}_{mec}$  – perdas internas e mecânicas na turbina (kW);

$\Delta\dot{Q}_{cond}$  – perdas de calor com a água de refrigeração no condensador da turbina (rejeição de calor para a fonte fria) (kW);

$\Delta\dot{Q}_{tub}$  – perdas de calor para o meio ambiente através das tubulações entre a caldeira e a turbina (kW);

$\Delta\dot{Q}_{cald}$  – perdas de calor na caldeira (kW);

$\dot{Q}_{vap\ processo}$  – fluxo de calor fornecido ao processo na forma de vapor d'água (kW);

$\dot{Q}_{cond}$  – fluxo de energia térmica devolvido ao sistema pelo retorno de condensado (kW).

A cogeração de energia em usinas sucroenergéticas é realizada por meio do ciclo de Rankine, o qual consiste na geração de vapor de alta pressão em uma caldeira, sendo este alimentado a uma turbina que realiza trabalho por meio da expansão isoentrópica do vapor, trabalho esse convertido em energia elétrica por um gerador. A Figura 2 ilustra as correntes e equipamentos do ciclo de Rankine em sistema de cogeração CEST (*Condensing-Extraction Steam Turbine*) aplicado ao setor sucroenergético.

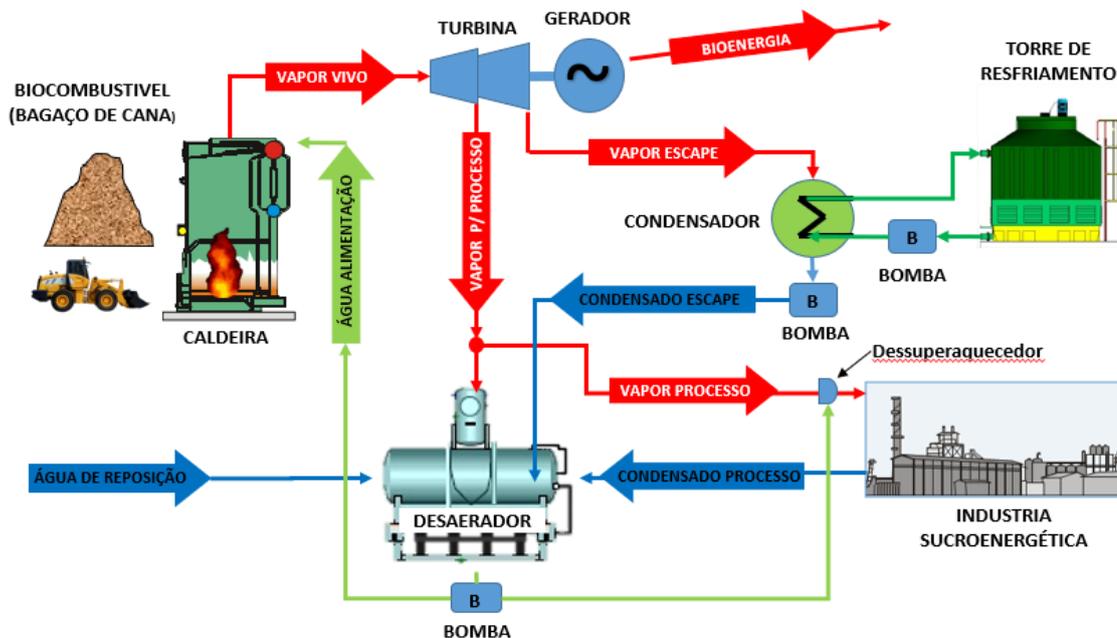


Figura 2- Sistema CEST de cogeração de energia no setor sucroenergético (adaptado de Pietro (2003))

Com diversos benefícios, a cogeração apresenta-se como a alternativa mais viável para atender a demanda térmica e elétrica de grandes indústrias, além da rentabilidade ao exportar o excedente de energia produzido.

Segundo Lora (2004), é possível obter ganho energético no ciclo implementando-se aquecedores regenerativos, os quais atuam reduzindo o calor rejeitado no processo. Aquecedores regenerativos são trocadores de calor que utilizam como fonte térmica o vapor proveniente de extrações da turbina para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira.

Com foco na questão da autossuficiência energética, o presente capítulo tem como objetivo principal demonstrar, por meio de simulações, a necessidade de implementação de sistemas de cogeração no setor sucroenergético, calculando o ganho de energia elétrica gerada por cada tonelada de cana processada em diferentes condições operacionais de pressão e temperatura do vapor. É também avaliada a utilização de aquecedores regenerativos de alta pressão para pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira visando ao aumento da eficiência térmica do ciclo.

## 2 | METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo foram analisados sistemas CEST (*Condensing-Extraction Steam Turbine*) comumente empregados no setor sucroenergético, operando com água de alimentação da caldeira a 120°C e único aquecedor aberto (desaerador). Sistemas CEST possuem melhor flexibilidade operacional, podendo a geração de energia elétrica ser mantida independente do consumo de energia térmica no processo industrial. Neste arranjo, o vapor (energia térmica) não direcionado ao

processo industrial continua a se expandir na turbina, gerando trabalho, condensando-se ao final e retornando ao ciclo. Como vantagem, todo o bagaço pode ser utilizado, maximizando, assim, a geração de energia elétrica.

Visando ao aumento da eficiência térmica no ciclo CEST foram simuladas condições operacionais com a implementação de pré-aquecedor regenerativo para elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira até 140, 160 ou 180°C dependendo das propriedades do vapor extraído da turbina e retornado ao pré-aquecedor (Figura 3).

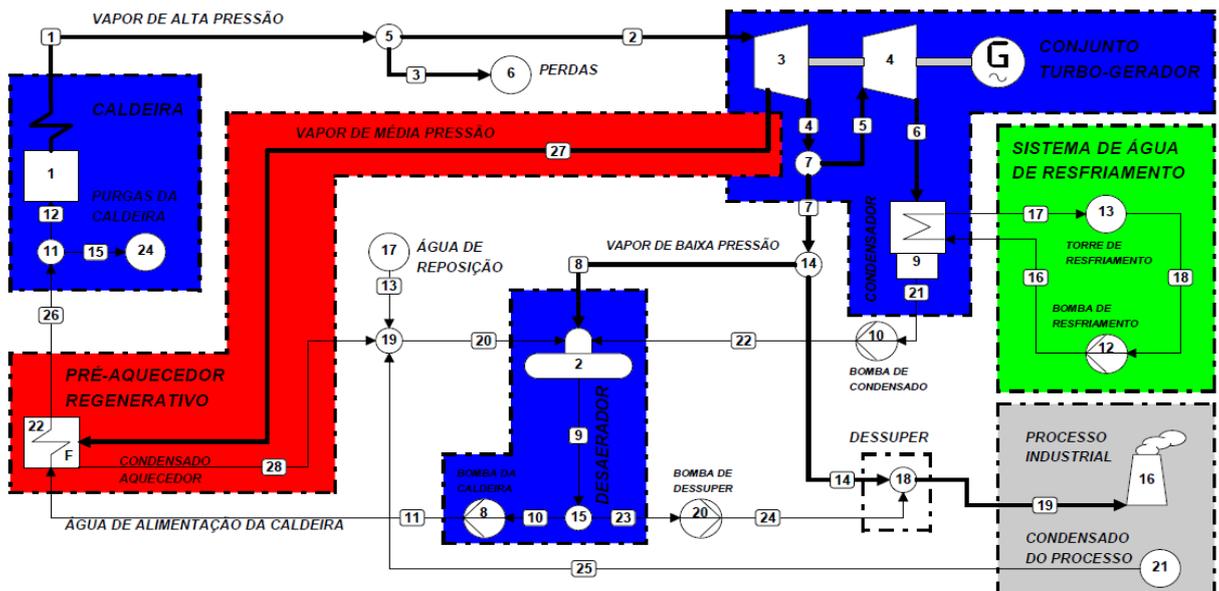


Figura 3 – Fluxograma de um ciclo de potência a vapor aplicado no setor sucroenergético com a implementação de aquecedor regenerativo de alta pressão (adaptado de Pietro (2003))

Para ambas as configurações de ciclo (sem e com aquecedor regenerativo) foram simuladas as seguintes condições de pressão e temperatura do vapor na saída da caldeira:

- pressão de 67 bar(a) à temperaturas de 490°C e 520°C;
- pressão de 100 bar(a) à temperaturas de 520°C e 540°C.

A modelagem matemática dos ciclos térmicos foi realizada a partir da elaboração de equações de balanço de massa e energia sobre o sistema (Tabela 1), as quais foram resolvidas utilizando-se o software *Cycle-Tempo*.

Turbina	$\dot{W}_t = \sum_{e: entrada} (\dot{m}_e \cdot h_e) - \sum_{s: saída} (\dot{m}_s \cdot h_s)$
Caldeira	$\dot{Q}_{ec} = \dot{m}_v (h_e - h_s) / \eta_{cald}$
Aquecedores regenerativos	$\sum_{e: entrada} (\dot{m}_e \cdot h_e) = \sum_{s: saída} (\dot{m}_s \cdot h_s)$
Consumo de combustível	$\dot{m}_{comb.} = \dot{Q}_{ec} / PCI_{comb.}$

Tabela 1 – Balanços de energia sobre os principais componentes do ciclo Rankine

Para as simulações, considerou-se uma unidade sucroenergética sem acionamentos mecânicos por turbinas, utilizando apenas vapor saturado para processo a 2,5 bar (pressão absoluta), para produção de açúcar e álcool. Consumo de 400 kg de vapor por tonelada de cana processada foi adotado como um valor adequado às plantas atuais (CASTRO et al., 2010). Considerou-se que 1000 kg de cana-de-açúcar moída geram 250 kg de bagaço com 50% de umidade e poder calorífico inferior (PCI) de 1790 kcal/kg (GOMES et. al, 2006). Recuperação de 95% do condensado do vapor enviado ao processo foi considerada de acordo com a análise exérgica realizada por Pellegrini (2009) para uma usina sucroalcooleira tradicional. Considerando o sistema hipoteticamente empregado para a coleta de condensado despressurizado, foi fixada a temperatura de 100°C para o condensado retornado ao desaerador.

Com base em dados de fabricantes foi fixada a eficiência da caldeira (base PCI) em 88%, eficiência isentrópica do turbo-gerador em 82% e eficiência do conjunto redutor-gerador em 95%. Como parâmetros adicionais para as simulações foram fixadas perdas de 2,5% de água devido às descargas da caldeira, 0,5% de perdas de vapor de alta pressão, declínio de 2 bar e de 10°C na tubulação de interligação entre a caldeira e a turbina e reserva de 5% do bagaço disponível para paradas e partidas da caldeira.

Para o cálculo da eficiência térmica do ciclo utilizou-se a fórmula clássica de Rankine segundo a qual a eficiência é dada pela razão entre a quantidade de energia convertida em trabalho líquido e aquela fornecida ao fluido de trabalho (MORAN; SHAPIRO, 2011):

$$\eta_{Rankine\ bruto} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{Q}_e} \quad \text{ou} \quad \eta_{Rankine\ liquido} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_e}$$

onde:

$\eta$  – rendimento (%);

$\dot{W}_t$  – potência da turbina (kW);

$\dot{W}_b$  – potência fornecida à bomba (kW);

$\dot{Q}_e$  – fluxo de calor de entrada, liberado na combustão (kW).

Nessa fórmula de Rankine não se considera o fornecimento de energia térmica a determinada fonte externa, o que é considerado no cálculo da eficiência térmica artificial. No cálculo dessa eficiência, considera-se que a energia utilizada pela planta de cogeração para gerar energia elétrica é dada pela diferença entre a energia total liberada na combustão e aquela utilizada para gerar calor em um sistema convencional (NOGUEIRA et al., 2004):

$$\eta_A = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_e - \frac{\dot{Q}_u}{\varepsilon_b}}$$

onde:

$\eta_A$  – eficiência térmica artificial (%);

$\varepsilon_b$  – rendimento do sistema convencional de fornecimento de calor (caldeira) (%);

$\dot{Q}_u$  – fluxo de calor útil produzido e fornecido à fonte externa (kW);

$\dot{Q}_e$  – fluxo de calor de entrada, liberado na combustão (kW).

O fluxo de calor fornecido ao processo ( $\dot{Q}_u$ ) é dado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_u = (\dot{m}_{vapor} * h_{vapor}) - (\dot{m}_{condensado} * h_{condensado})$$

onde:

$\dot{m}_{vapor}$  – fluxo de massa de vapor fornecido à fonte externa (kg/s);

$\dot{m}_{condensado}$  – fluxo de massa de condensado retornado da fonte externa (kg/s);

$h_{vapor}$  – entalpia do vapor fornecido a fonte externa (kJ/kg);

$h_{condensado}$  – entalpia do condensado retornado da fonte externa (kJ/kg);

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ganho energético, em relação ao ciclo convencional, obtido com o pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira utilizando aquecedores regenerativos é apresentado na Tabela 2. Nesta tabela pode-se observar que o ganho varia entre 1,63 e 3,89%, valores aparentemente pequenos, mas que, para uma unidade na qual fossem processadas 3 milhões de toneladas de cana e utilizado ciclo térmico operando a 100 bar, 540°C e temperatura da água de caldeira de 120°C, poderiam aumentar em até 12.780 MW.h/ano a geração de energia com a instalação de aquecedor regenerativo para pré-aquecimento da água da caldeira até uma temperatura de 180°C. Esse excedente de energia seria suficiente, por exemplo, para atender a demanda anual de 5.325 residências familiares com consumo médio de 200 kW.h/mês.

Pressão e temperatura de vapor na caldeira	Temperatura da água: 140°C	Temperatura da água: 160°C	Temperatura da água: 180°C
67 bar(a), 490 °C	1,67 %	2,72 %	3,17 %
67 bar(a), 520 °C	1,63 %	2,65 %	3,09 %
100 bar(a), 520 °C	1,87 %	3,09 %	3,79 %
100 bar(a), 540 °C	2,01 %	3,20 %	3,89 %

Tabela 2 – Ganho energético obtido em ciclos regenerativos com pré-aquecedores regenerativo de água

A Figura 4 apresenta os valores de geração de energia no ciclo regenerativo em função das diferentes condições operacionais de pressão e temperatura utilizadas, informando para fins de comparação, a energia gerada no ciclo convencional operado à temperatura de água de alimentação da caldeira de 120°C. Analisando-se a Figura 4, pode-se constatar que há um ganho energético com a utilização de pré-aquecedores regenerativos para todas as condições operacionais simuladas, obtendo-se ganhos mais elevados para as condições mais extremas de operação (maiores pressões e temperaturas do vapor).

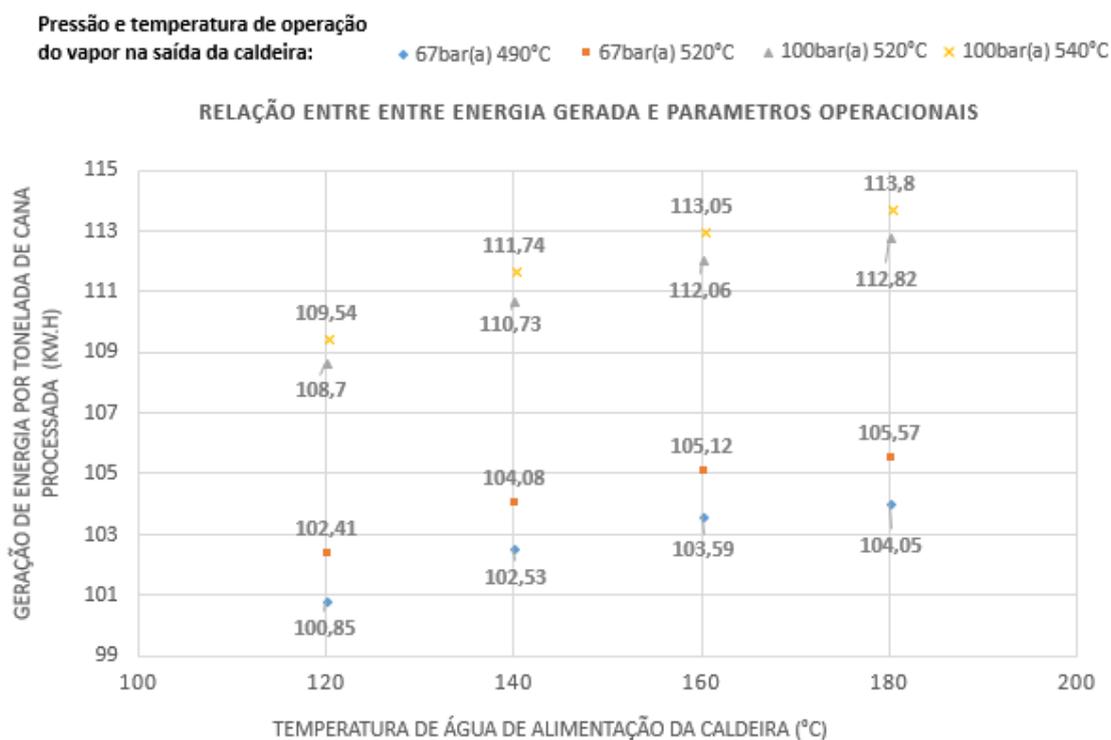


Figura 4 – Geração de energia elétrica por tonelada de cana processada nos ciclos

Visando comparar os valores calculados de eficiência, as Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a eficiência térmica calculada pela equação de Rankine e aquela calculada considerando o fluxo de calor fornecido para fonte externa (eficiência artificial).

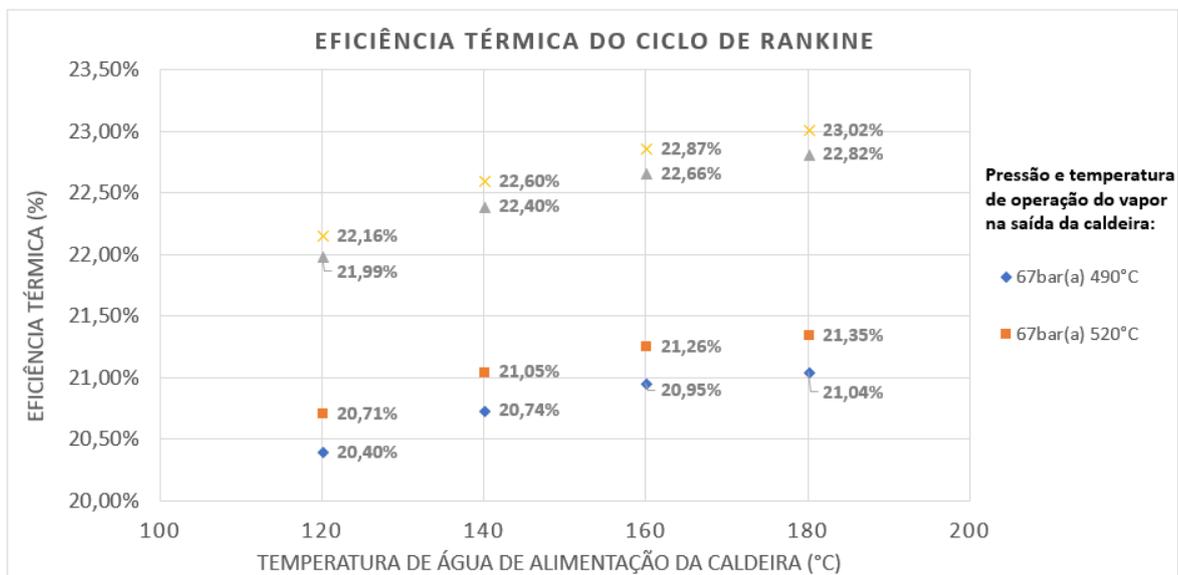


Figura 5 – Eficiência térmica de Rankine

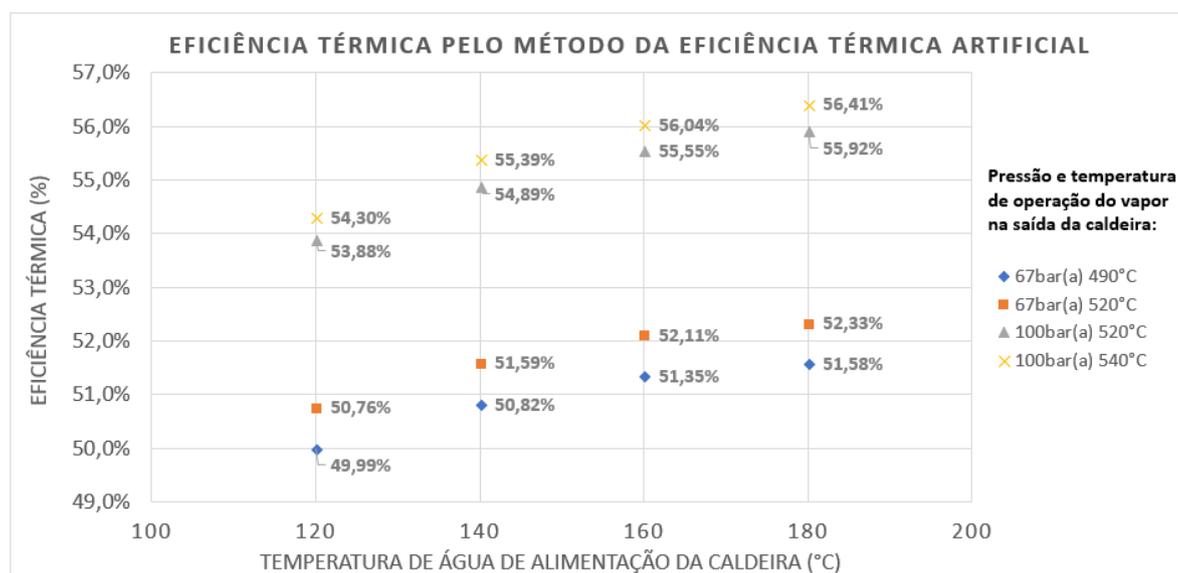


Figura 6 – Eficiência térmica artificial

Quando comparando sistemas de potência a vapor com fornecimento de cargas térmicas diferentes, o valor da eficiência artificial pode fornecer a falsa impressão de que o maior consumo de energia térmica pela fonte externa é benéfico para o sistema de cogeração, entretanto, esse valor considera apenas a utilização da energia proveniente do combustível que é transformada em energia elétrica ou fornecida ao processo como energia térmica. Portanto, unidades que consomem menor carga térmica em seus processos, possuem maior quantidade de energia disponível para conversão em energia elétrica.

#### 4 | CONCLUSÃO

Neste capítulo, demonstrou-se que a implementação de pré-aquecedores regenerativos em ciclos de potência a vapor proporciona um ganho energético que

se torna maior quando o ciclo é operado a altas pressões e temperaturas do vapor. Entretanto, a escolha das condições operacionais mais apropriadas dependerá dos custos de aquisição dos equipamentos bem como do tempo de retorno do investimento pretendido para o empreendimento. Sabe-se que os custos dos equipamentos aumentam com o aumento da pressão e temperatura operacionais e que o custo de instalação do pré-aquecedor regenerativo deve também ser considerado na análise de viabilidade técnico-econômica, consistindo a determinação das melhores condições operacionais em um problema de otimização de processo.

Os resultados obtidos mostram que a eficiência térmica do ciclo é mais propriamente avaliada utilizando-se a equação clássica de Rankine do que a equação que considera o fluxo de calor fornecido para fonte externa (eficiência artificial).

## REFERÊNCIAS

CASTRO J. C., BRANDÃO R., DANTAS G. A. **O potencial da bioeletricidade, a dinâmica do setor e o custo estimado dos investimentos**. Rio de Janeiro, 2010

GOMES S. C., PARAÍSO P. R., ANDRADE C. M. G. **Análise preliminar da viabilidade de cultivos florestais para produção de energia elétrica**. Revista técnico-científica da área de energia, Paraná, n. 4, p. 32-41, 2006.

LORA, E. E. **Centrais térmicas a vapor**. In: LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. GERAÇÃO TERMELÉTRICA: Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, 2 v. p.633-67.

NOGUEIRA, L. A. H.; TEIXEIRA, F. N.; CARVALHO, F. R. **Cogeração e Geração Distribuída**. In: LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. GERAÇÃO TERMELÉTRICA: Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, 2 v. p.743-787.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**, 2009. 350f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PIETRO, M. G. S. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso**, 2003. 255f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WALTER, A. C. S. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**, 1994. 263f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

## **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

