



# As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

---

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a  
Economia e o Meio Ambiente 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> 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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506  1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série.  CDD 658.5
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

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

## 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>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio Maria do Carmo de Andrade Nono José Vitor Cândido de Souza Sergio Luiz Mineiro Daniel Alessandro Nono	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos Daniel Araújo Farias de Melo Marinésio Pinheiro de Lima Tiago de Freitas Viana Igor Fernandes Gomes Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>26</b>
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>42</b>
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo Aline Castilho Rodrigues Andres Cuña Nestor Tancredi Eduardo Mendez Heide Heloise Bernardi Mauricio Ribeiro Baldan	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>55</b>
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado Antônio Viana da Fonseca Eduardo Fortunato Daniela Raquel Ferreira Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925065</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>71</b>
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925066</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>80</b>
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925067</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>92</b>
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925068</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>100</b>
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925069</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>111</b>
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250610</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>127</b>
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250611</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>142</b>
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250612</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>153</b>
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250613</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>156</b>
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>168</b>
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>183</b>
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>198</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>207</b>
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250618</b>	

<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>215</b>
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>223</b>
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>230</b>
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250621</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>243</b>
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250622</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>261</b>
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250623</b>	

<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>275</b>
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250624</b>	
<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>287</b>
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250625</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>294</b>
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250626</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>307</b>
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250627</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>322</b>
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250628</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>333</b>
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250629</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>346</b>

## ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM

### **Eduardo Dal Piva Schuch**

Universidade Feevale, ICCT  
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

### **Magaiver Gabriel Lamp**

Universidade Feevale, ICCT  
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

### **Conrado Mendes Morais**

Universidade Feevale, ICCT  
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

### **Ângela Beatrice Dewes Moura**

Universidade Feevale, ICCT  
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

**RESUMO:** A maioria dos equipamentos utilizados atualmente na indústria para secagem se baseiam em um mecanismo de convecção forçada. Por este processo frequentemente possui baixa eficiência térmica, novos métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo numérico, através do software COMSOL Multiphysics, em um equipamento de secagem que tem seu funcionamento baseado em um processo de irradiação infravermelha oriunda do aquecimento de um resistor metálico. Os resultados que o modelo computacional apresentou demonstraram ser muito próximos ao do modelo real, com diferença percentual máxima de 3,26%, validando o modelo simulado

e possibilitando estudos no comportamento do modelo real através de alterações no modelo computacional. Foram realizadas investigações no posicionamento do resistor, onde observou-se que o aumento de sua altura ocasionou temperaturas maiores no corpo de prova testado. Investigações na rotação do resistor demonstraram que o alinhamento de seu sentido longitudinal com o trajeto percorrido pelo corpo de prova resultou em aumentos de temperatura consideráveis, de cerca de 9,8%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Radiação Térmica, Eficiência Energética, Avaliação Numérica, Engenharia Assistida por Computador.

### NUMERICAL STUDY OF A DRYING EQUIPMENT

**ABSTRACT:** Most drying equipment utilized in industrial applications nowadays are based in a forced convection mechanism. Due to the low thermal efficiency often related to this process, new methods have been in development throughout the years. This study is designed to perform a numerical analysis through COMSOL Multiphysics software in a drying equipment whose functioning is based in an infrared irradiation process that comes from the heating of a metallic resistor. The results obtained from the computational model were found to be very

close to the real model, with a percentage difference of 3.26%, validating the simulated model and allowing for studies in the behavior of the real model through changes in the computational model. Changes in the positioning of the resistor were investigated, where it was noticed that increasing its height would result in greater temperatures in the analyzed proof body. Further investigations in the rotation of the resistor demonstrated that the alignment of its longitudinal direction with the path followed by the proof body resulted in substantial temperature increases of about 9.8%.

**KEYWORDS:** Thermal Radiation, Energy Efficiency, Numerical Evaluation, Computer-Aided Engineering.

## 1 | INTRODUÇÃO

Equipamentos de secagem de produtos por meio de radiação existem como uma alternativa ao método de transferência de calor por convecção quando este possui baixa eficiência energética. As principais tecnologias se baseiam em radiação ultravioleta, infravermelha, micro-ondas, ondas de rádio e feixe de elétrons, sendo que cada um destes tem suas aplicações específicas, vantagens e desvantagens.

Paralelamente, softwares de simulação computacional vêm ganhando espaço dentro de ambientes industriais e acadêmicos pela capacidade de fornecerem dados sobre o funcionamento de máquinas, equipamentos e processos, diminuindo o número de testes empíricos necessários para a obtenção de resultados satisfatórios e, por consequência, o investimento necessário em projetos. Isso possibilita a executivos desenvolverem novos produtos a um preço mais baixo e a pesquisadores estudarem técnicas que contribuam ao avanço tecnológico sem a necessidade de um alto investimento por parte da instituição em que atuam.

Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho é mostrar uma avaliação numérica computacional em um equipamento em desenvolvimento, que se baseia na irradiação de ondas infravermelhas para secagem e aquecimento de peças utilizadas em processos industriais. A partir da validação de um modelo computacional, podem ser propostas alterações nas configurações do equipamento de forma a prover melhorias de processo.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Algumas fundamentações sobre radiação térmica, vitais para o entendimento dos temas abordados, não são tão difundidas entre engenheiros mecânicos como conhecimentos de termodinâmica e transferência de calor, portanto serão apresentadas informações que facilitam o entendimento da metodologia aplicada e dos resultados obtidos.

## 2.1 Interações da radiação com a matéria e fluxos radiativos

A radiação eletromagnética pode ser vista como resultado da propagação de ondas eletromagnéticas. Estas ondas carregam energia e, portanto, permitem que exista troca energética entre corpos através das ondas, possibilitando a transferência de calor por radiação. A partir do momento em que a radiação entra em contato com matéria, três fenômenos diferentes podem ocorrer: ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Na absorção, a energia da onda eletromagnética é absorvida, permitindo o aumento da temperatura e conseqüentemente da energia do sistema. Na reflexão, a energia não contribui para o sistema material em contato e é redirecionada para outro local através do contato com a superfície. Já na transmissão, a energia atravessa o material, mas não é absorvida, não contribuindo para o sistema material. A Figura 1 demonstra visualmente as possibilidades de interação da radiação incidente com a matéria em contato (INCROPERA et al., 2014).

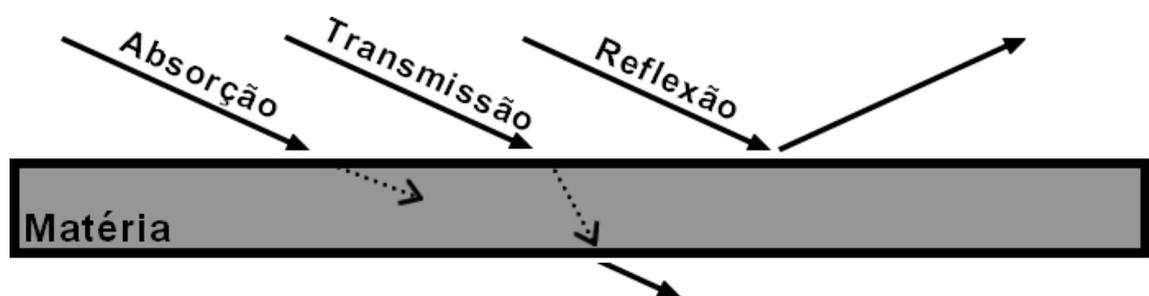


FIGURA 1. Absorção, reflexão e transmissão de radiação térmica.

Fonte: Autor (2018).

A reflexão se divide em dois tipos de reflexão ideais, onde pode ser completamente especular ou completamente difusa. Na reflexão difusa, a radiação é refletida igualmente em todas as direções, enquanto a reflexão especular gera um feixe direcional em que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência do feixe, tendo como exemplo um espelho. Em superfícies reais, a reflexão ocorre de forma irregular, apresentando uma mistura dos dois tipos, porém não há dados detalhados para estas reflexões reais, já que adicionam mais complicações para a análise (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Com base nestas três possibilidades de interação da radiação térmica com a matéria, surgem quatro conceitos amplamente utilizados em modelos que envolvem radiação: absorvidade ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ ), que determinam qual percentual da radiação incidente em um corpo é absorvido, refletido e transmitido, respectivamente, e irradiação ( $G$ ), o primeiro dos quatro fluxos radiativos importantes na transferência de calor por radiação, que representa toda a radiação que é incidente em uma superfície.. Corpos que não transmitem radiação são ditos opacos, onde a irradiação será apenas absorvida ou refletida, como demonstrado na Equação 1, onde “ $\alpha$ ” representa a absorvidade, “ $\rho$ ” representa a refletividade e “ $G$ ” representa a

irradiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$\alpha G + \rho G = G \quad (1)$$

O segundo fluxo radiativo a ser tratado é a emissão (E), que se trata da radiação emitida por um corpo em função de sua temperatura. Corpos com a mesma temperatura podem emitir quantidades de radiação diferentes, originando o conceito de corpo negro, aquele em que a emissão é a máxima possível para uma determinada temperatura. Corpos cinzas emitirão um percentual desta máxima radiação possível, chamado de emissividade ( $\epsilon$ ). Assim, para corpos negros a emissividade será sempre igual à 1. A Equação 2 apresenta o cálculo da emissão de um corpo cinza, onde “E” é a emissão, “ $\epsilon$ ” é a emissividade, “T” a temperatura e “ $\sigma$ ” a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor aproxima-se de  $5,67 \times 10^{-8}$  (INCROPERA et al., 2014).

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

Com os dois fluxos apresentados até então, é possível perceber que uma superfície opaca emanará energia tanto pela emissão em função da temperatura do corpo quanto pela reflexão de quaisquer irradiações aplicadas nela. Este entendimento leva ao terceiro fluxo radiativo, chamado de radiosidade (J), que representa toda a radiação que deixa uma superfície. A Equação 3 governa a radiosidade de uma superfície opaca, onde “J” representa a radiosidade, “E” a emissão, “G” a irradiação e “ $\rho$ ” a refletividade (INCROPERA et al., 2014).

$$J = E + \rho G \quad (3)$$

Todos os três fluxos apresentados até o momento resultam em energia sendo transportada por radiação de um local até outro, porém nenhum destes representa a quantidade líquida de energia que é trocada, ou seja, o balanço entre a energia que sai e que entra por uma superfície ou corpo. Isto leva ao quarto e último fluxo, o fluxo radiativo líquido ( $q_r$ ), igual à diferença entre a radiação que sai e entra de uma superfície, conforme demonstrado na Equação 4, válida para corpos opacos, onde “ $q_r$ ” representa o fluxo radiativo líquido, “J” a radiosidade, “G” a irradiação, “E” a emissão e “ $\alpha$ ” a absortividade (INCROPERA et al., 2014).

$$q_r'' = J - G = E - \alpha G \quad (4)$$

## 2.2 Dependência espectral e direcional

Todas as propriedades descritas foram explicadas desconsiderando o comprimento de onda, porém a maioria delas são dependentes desta característica das ondas. Tinta branca, por exemplo, parecerá refletir quase toda a energia incidente para um observador humano, porém será altamente absorvente para radiação infravermelha. Isso ocorre porque sua absortividade espectral ( $\alpha_\lambda$ ) é maior para o comprimento de onda ( $\lambda$ ) infravermelho enquanto a refletividade espectral ( $\rho_\lambda$ ) é menor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Além da dependência espectral, também existe a dependência direcional. A radiação que sai de uma superfície plana e opaca é transmitida em todas as direções do hemisfério acima da superfície e sai de todas as partes do corpo, assim como a irradiação aplicada em uma superfície pode vir de várias direções diferentes. Não só a forma como a superfície se comportará no contato com a irradiação depende desta direção, como também a distribuição direcional da radiação emitida não é uniforme. Isto resulta em quantidades de absortividades, refletividades, transmissividades e emissividades diferentes em um mesmo modelo, que podem influenciar os fluxos radiativos. Além disto, a determinação dos diferentes valores destas propriedades é na maioria das vezes inviável, sendo comum que estas dependências sejam desconsideradas em estudos (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

Uma superfície difusa irá absorver, refletir, transmitir e emitir radiação sem depender da direcionalidade, resultando em fluxos hemisféricos. Já uma superfície cinza, irá absorver, refletir, transmitir e emitir radiação sem depender do comprimento de onda, resultando em fluxos totais. Sendo assim, a idealização de superfícies como difusas e cinzas remove todas as dependências de direcionalidade e comprimento de onda da emissividade, absortividade, refletividade e transmissividade, facilitando expressivamente os cálculos envolvendo a transferência de calor por radiação ao tornar todos os fluxos hemisféricos e totais (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

## 2.3 Lei de Kirchhoff

Se um elemento é colocado dentro de um invólucro negro, ambos com a mesma temperatura, o invólucro irá irradiar o elemento de todas as direções. Como ambos possuem a mesma temperatura, não ocorrerá transferência de calor, conforme impõe a segunda lei da termodinâmica. Para que isso aconteça, o elemento deve absorver e emitir energia radiativa em quantidades iguais, exigindo, portanto, que a emissividade e a absortividade tenham o mesmo valor, validando a Equação 5, intitulada Lei de Kirchhoff, onde “ $\alpha$ ” representa a absortividade e “ $\varepsilon$ ” representa a emissividade (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

$$\alpha = \varepsilon \quad (5)$$

A emissividade sempre será igual à absorvidade para um mesmo comprimento de onda, em uma mesma direção e com uma mesma temperatura entre o corpo que emite e o que absorve, onde não haverá fluxo de calor. Sempre que houver fluxo de calor, a absorvidade e emissividade poderão ter valores diferentes, porém a equivalência pode ser mantida para simplificar os cálculos, obtendo-se assim uma aproximação. Para corpos opacos sob esta condição, a refletividade pode ser calculada conforme a Equação 6, onde “ $\rho$ ” representa a refletividade, “ $\alpha$ ” a absorvidade e “ $\varepsilon$ ” a emissividade (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon \quad (6)$$

Conforme demonstrado na Equação 6, quando a Lei de Kirchhoff é imposta em um modelo de corpos opacos, o conhecimento de uma única propriedade é suficiente para determinar as outras duas. Por este motivo que tabelas de emissividades são amplamente difundidas, enquanto absorvidades e refletividades geralmente não são investigadas – a Lei de Kirchhoff é uma imposição na grande maioria dos modelos que tratam de radiação.

## 2.4 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são métodos de aproximação numérica aplicados em equações diferenciais, onde estas são substituídas por equações algébricas. Resultam, junto com os métodos analíticos, nas ferramentas teóricas que um engenheiro tem em sua disposição para lidar com as equações diferenciais e resolver problemas físicos na teoria. A outra forma de lidar com problemas de engenharia é a utilização da experimentação em laboratórios, porém estas podem ser custosas e muitas vezes não podem ser realizadas por questões de segurança, como por exemplo na obtenção de informações sobre transferência de calor em reatores nucleares. As limitações dos métodos analíticos e das experimentações reais são um dos motivos para a utilização de métodos numéricos, já que estes praticamente não apresentam restrições; problemas de alta complexidade podem ser trabalhados com a segurança e praticidade de computadores (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Soluções analíticas possuem várias limitações para problemas reais, sendo necessária a utilização de modelos altamente simplificados, tanto em geometria quanto em considerações iniciais de resolução. Quando pequenas considerações são feitas em relação à geometria na transferência de calor, como zonas de heterogeneidade, ou quando parâmetros utilizados nos cálculos perdem a simplificação, como passar a considerar que os coeficientes de transferência de calor sofrem variações de acordo com a temperatura, por exemplo, as soluções analíticas podem se tornar impossíveis.

Dessa forma, métodos analíticos acabam entregando soluções exatas de modelos ideais, mas soluções grosseiras de problemas reais, o que acaba tendo precisão inferior a uma solução aproximada de um modelo real (MALISKA, 2004).

A resolução numérica de problemas de transferência de calor por radiação entre superfícies opacas é realizada através do método da radiosidade, onde as superfícies são todas consideradas difusas. Dessa forma, a transferência depende apenas da localização de superfícies relativas a outras e suas orientações, para todas as superfícies dos domínios onde a transferência de energia radiativa se aplica. Esta condição cria identidades geométricas chamadas de fatores de forma, representados pela fração da energia emitida por um elemento de superfície e interceptado por outro (REY, 2016).

### 3 | METODOLOGIA

O modelo de aquecimento simulado consiste em um aquecedor posicionado sobre uma linha de produção contínua, onde as peças são aquecidas ao percorrerem um trajeto em seu interior. Neste equipamento, instalado em uma indústria, foram medidas temperaturas de saída de um corpo de prova (CP) em três diferentes tempos de passagem, com a utilização de um pirômetro FLIR, que também foi usado para medir as temperaturas da esteira no interior e exterior do equipamento. Com um termopar tipo K, mediu-se a temperatura do ar no interior do equipamento e com um multímetro Minipa foram medidas a corrente e a tensão no resistor elétrico, utilizadas para cálculo da potência.

A avaliação numérica foi realizada através do *software* COMSOL *Multiphysics*, de posse da Universidade Feevale. O *software* utiliza a discretização por elementos finitos e calcula a troca de energia térmica radiativa entre superfícies através do método da radiosidade.

Para realizar as simulações, foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Fluxos convectivos no interior e no exterior do forno, para também considerar a troca de calor com o ar;
- Temperatura inicial na carcaça do forno igual à temperatura do ar em seu interior, de forma a simular um equipamento já aquecido, enquanto a temperatura inicial no CP manteve-se igual à temperatura ambiente no instante dos ensaios experimentais;
- Radiosidade prescrita na superfície do resistor, calculada pela razão entre potência medida no equipamento e a área desta superfície;
- Fluxo convectivo fixo aplicado no CP, com temperatura igual à medida no interior do aquecedor;
- Temperaturas fixas nas partes da esteira que ficam dentro e fora do equipamento, com base nos valores medidos experimentalmente;

- Três velocidades de deslocamento do CP diferentes, sendo estas as velocidades necessárias para que o trajeto pelo interior do equipamento seja completado nos três tempos: 30, 60 e 90 segundos.

O método da radiosidade estabelece que todas as superfícies são difusas, desprezando a dependência direcional. A construção do software impõe a Lei de Kirchhoff, desconsiderando possíveis diferenças entre absorvidade e emissividade. Como a maior fonte de radiação térmica é o resistor elétrico, que possui um pico de comprimento de onda específico, as superfícies foram consideradas como cinzas, desprezando a dependência espectral.

A validação do modelo numérico se deu através da comparação entre as temperaturas simuladas em um CP para cada um dos tempos considerados com as temperaturas medidas experimentalmente. Utilizou-se como base para o modelo simulado um protótipo de aquecedor com paredes de aço carbono SAE 1020, mesmo material aplicado na esteira. O exterior do equipamento e a esteira são revestidos com uma camada de tinta. O CP utilizado é feito de PVC.

Após a validação do modelo numérico, foram efetuados três estudos com diferentes posicionamentos do resistor. Em dois dos estudos foi alterada sua altura dentro do equipamento, que originalmente é de 70 milímetros em relação ao topo do CP, enquanto em um terceiro o resistor foi rotacionado em 90°, conforme ilustrado na Figura 2, onde o posicionamento original é representado na posição A e a rotação de 90° representada na posição B.

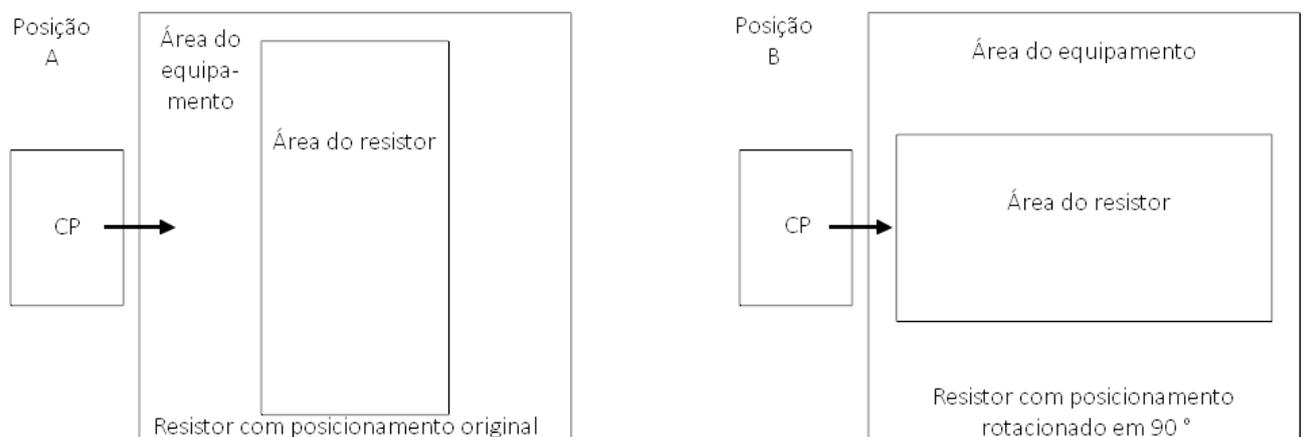


FIGURA 2. Resistor nas posições A (esquerda) e B (direita). Fonte: Autor (2018).

Foram também testadas diferentes configurações de qualidade de malha até que posteriores refinamentos não mais causassem mudanças significativas nas temperaturas resultantes. Com isso, foi selecionada a malha mais adequada.

## 4 | RESULTADOS E ANÁLISES

A temperatura ambiente de 26,3 °C foi medida no momento dos ensaios

experimentais. A potência do equipamento foi calculada em 980 W, através das medições de corrente e tensão elétrica de 7 A e 140 V, respectivamente. Sendo a área da superfície do resistor de 0,18 m<sup>2</sup> a radiosidade prescrita no resistor foi calculada, resultando em um fluxo de 5450 W/m<sup>2</sup>.

A temperatura do ar no interior do aquecedor foi medida em 135 °C, enquanto a temperatura da parte interna da esteira foi medida em 140 °C e da parte externa em um ponto próximo à saída em 90 °C.

Estes valores foram utilizados em todas as simulações realizadas.

No estudo de malha, foi selecionada uma configuração com 2639 tetraedros. A simulação computacional do processamento do corpo de prova (CP) pelo equipamento com a malha escolhida resultou nos resultados apresentados na Tabela 1.

Tempo (s)	Temperaturas medidas (médias) (°C)	Temperaturas simuladas (°C)	Diferença percentual
30	93	89.97	-3.26%
60	116	119.46	2.98%
90	135	136.95	1.44%

TABELA 1. Temperaturas no centro do CP na saída do aquecedor.

Fonte: Autor (2018).

Como demonstrado na Tabela 1, as temperaturas simuladas apresentaram boa proximidade com as medidas experimentalmente, validando o modelo de simulação. Com este resultado, foram iniciados os estudos com diferentes posicionamentos do resistor.

A primeira alteração no posicionamento testada foi a altura de todo o conjunto do resistor em duas situações: 105 e 20 milímetros de altura em relação ao topo do CP. Os resultados são apresentados na Tabela 2 e comparados com os obtidos considerando a altura original de 70 milímetros.

Período (s)	Altura de 70 mm (°C)	Altura de 105 mm (°C)	Altura de 20 mm (°C)
30	89.97	91,89	89,71
60	119.46	123,12	119,0
90	136.95	136,97	133,08

TABELA 2. Temperaturas simuladas no centro do CP na saída do aquecedor, para diferentes alturas de resistor.

Fonte: Autor (2018).

Como pode ser visualizado na Tabela 2, a elevação da altura ocasionou temperaturas no CP maiores enquanto a diminuição resultou em temperaturas

menores. O que se percebe é que maiores distâncias entre a fonte e o CP facilitam a transferência de calor, uma vez que as ondas eletromagnéticas têm mais espaço de reflexão.

A investigação realizada posteriormente foi a alteração no posicionamento do resistor, que foi rotacionado em 90° (posição B). A simulação foi executada para uma altura do resistor de 105 milímetros, que no estudo anterior resultou em temperaturas maiores. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Período (s)	Temperaturas na Posição A (°C)	Temperaturas na Posição B (°C)
30	91,89	101,33
60	123,12	135,36
90	136,97	149,52

TABELA 3. Temperaturas simuladas no centro do CP na saída do aquecedor, para a altura do resistor de 105 mm.

Fonte: Autor (2018).

Observa-se, com os resultados demonstrados na Tabela 3, que com a posição B obtiveram-se aumentos de temperatura no CP em todos os tempos testados, com uma média de aumento de 9,8%. Isto se deve à maior irradiação sobre o CP de energia emitida diretamente do resistor, já que o CP se posicionou logo abaixo do resistor em quase todo o trajeto pelo interior do aquecedor.

## 5 | CONCLUSÕES

O trabalho mostrou a validação de um modelo numérico de um secador. As simulações apresentaram bons resultados com um desvio máximo de 3,26%, possibilitando, portanto, investigações no equipamento através de modificações no modelo computacional.

As alterações realizadas na altura demonstraram que sua elevação aumenta a quantidade de energia radiativa recebida pelo CP que passa através do equipamento. Esta conclusão é sustentada pelas temperaturas superiores encontradas no corpo de prova do cenário de altura do resistor elevada, na Tabela 2, para o fluxo convectivo considerado.

A rotação realizada no resistor ocasionou aumentos na temperatura do CP em todos os tempos, resultando em uma média de aumento de 9,8%. Nota-se que, com este posicionamento, um corpo de prova que percorre o meio da esteira recebe uma quantidade de irradiação maior.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 904 p.

HOWELL, John R.; SIEGEL, Robert; MENGÜÇ, M. Pinar. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 5. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. 957 p.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. Jefferson City: John Wiley & Sons, 2014. 1048 p.

MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2004. 460 p.

REY, Guillem Colomer. **Numerical methods for radiative heat transfer**. 2006. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Físicas, Departamento de Máquinas e Motores Térmicos, Universidade Politécnica de Catalunya, Terrassa, 2006.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-432-0

