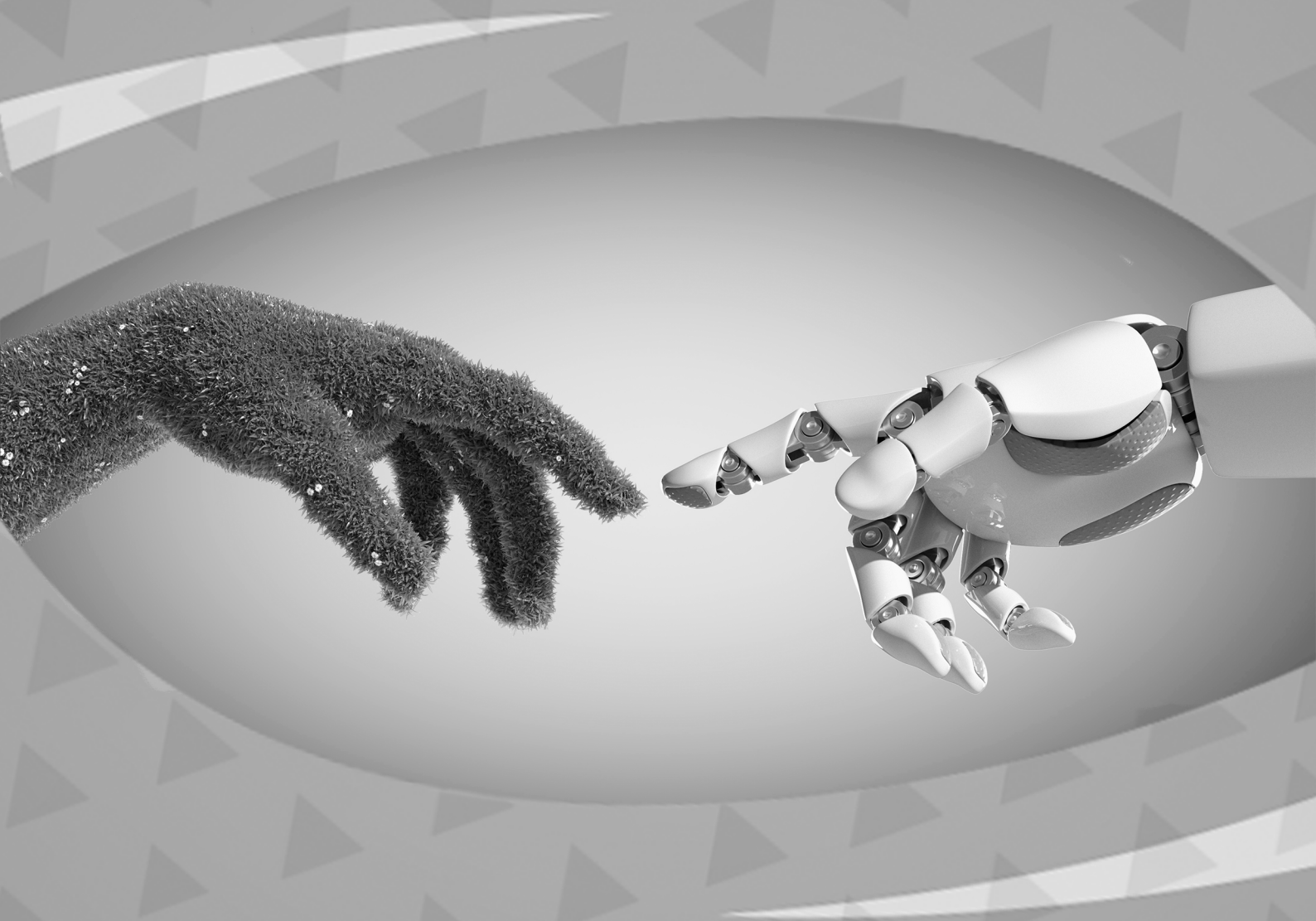


**Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio  
(Organizadores)**



# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5**

**Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio  
(Organizadores)**



# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5**

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Lorena Prestes

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

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> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

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. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

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

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora  
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. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof<sup>a</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof<sup>a</sup> Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Prof<sup>a</sup> Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof<sup>a</sup> Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>a</sup> Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof<sup>a</sup> Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA  
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis  
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR  
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	<p>As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 5 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Leonardo Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF            Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader            Modo de acesso: World Wide Web            Inclui bibliografia            ISBN 978-65-5706-087-2            DOI 10.22533/at.ed.872200806</p> <p>1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Tullio, Leonardo.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
<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

A obra “As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5” contempla vinte e um capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas e inovações aplicadas nas mais diversas áreas da engenharia.

Pesquisas na área de engenharia elétrica trazem informações sobre transmissão, geração de energia, bem como, pesquisas visando a sustentabilidade e eficiência energética.

São apresentados trabalhos referentes a robótica, demonstrando estudos sobre ferramentas que visam a construção de equipamentos que auxiliam as pessoas a executar determinadas atividades de forma autônoma.

O estudo sobre materiais e seu comportamento auxiliam na compreensão sobre suas propriedades, o que permite a utilização em diversas áreas.

Estudos sobre urbanização, influência do vento na estrutura de edificações, conforto térmico e saneamento também são objetos desta obra.

Esperamos que esta obra promova ao leitor o desejo de desenvolver ainda mais pesquisas, auxiliando na constante transformação tecnológica que a sociedade vem sofrendo, visando a melhoria da qualidade do meio ambiente e economia. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
A EXPERIENCIA DA CHESF NA REPOTENCIAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS DA HIDRELÉTRICA PAULO AFONSO II	
Emmanuel Moura Reis Santos Edson Guedes da Costa Luiz Antônio Magnata	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
AVALIAÇÃO DO MODELO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ADOTADO NO BRASIL DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE APRIMORAMENTO	
João Carlos de Oliveira Mello Evelina Maria de Almeida Neves Dalton Oliveira Camponês do Brasil Eduardo Nery Thais Prandini	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO EM INSTALAÇÕES DE CORRENTE CONTÍNUA – DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MEDIÇÃO PARA ATENDIMENTO AOS LIMITES DEFINIDOS PELA ANEEL	
Athanasio Mpalantinos Neto Carlos Ruy Nunez Barbosa Luís Adriano de Melo Cabral Domingues Paulo Roberto Gonçalves de Oliveira Rafael Monteiro da Cruz Silva Júlio César A. de Aguiar	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>35</b>
AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO NO VIÉS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DOS PLANOS ENERGÉTICOS REFERENCIAIS DO SETOR ELÉTRICO DAS NAÇÕES	
Flavio Minoru Maruyama Andre Luiz Veiga Gimenes Luiz Claudio Ribeiro Galvão Miguel Edgar Morales Udaeta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
CONSTRUÇÃO DE TURBINA DE TESLA E VALIDAÇÃO DE MODELO TEÓRICO	
Lucas Vinicius Capistrano de Souza Leonardo Haerter dos Santos Jader Flores Schmidt Moises da Silva Pereira Agnaldo Rosso	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008065</b>	



**CAPÍTULO 6 ..... 64**

DIMINUIÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO COM A SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS POR SUPERCAPACITORES

Lourival Lippmann Junior  
Rafael Wagner  
Carlos Ademar Purim  
Francisco José Rocha de Santana

**DOI 10.22533/at.ed.8722008066**

**CAPÍTULO 7 ..... 75**

O FUTURO DAS TÉRMICAS NA MATRIZ BRASILEIRA – PRÁTICAS E FUNDAMENTOS

João Carlos de Oliveira Mello  
Thaís Melega Prandini  
Marcelo Ajzen  
Xisto Viera Filho  
Edmundo Pochman da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.8722008067**

**CAPÍTULO 8 ..... 88**

UMA VISÃO DE MERCADO NA GESTÃO DE RISCOS DE CONSUMIDORES ELETROINTENSIVOS - MELHORES PRÁTICAS

João Carlos de Oliveira Mello  
Camila Câmara Lourenço  
Rodrigo Viana  
Rogério Catarinacho  
Nicolas Jardin Jr

**DOI 10.22533/at.ed.8722008068**

**CAPÍTULO 9 ..... 101**

CONTROLE SIMPLES E ROBUSTO PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS ATRAVÉS DO MOVEIT

Kaike Wesley Reis  
Rebeca Tourinho Lima  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.8722008069**

**CAPÍTULO 10 ..... 109**

DOOGIE MOUSE: UMA PLATAFORMA OPEN SOURCE PARA APLICAÇÃO DE ALGORITMOS INICIAIS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ROBÓTICA MÓVEL

Caio Alves Amaral  
Mateus dos Santos Meneses  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.87220080610**

**CAPÍTULO 11 ..... 118**

SEISMIC IMAGING USING FPGA APPLIED FOR REVERSE TIME MIGRATION

Joaquim Ranyere Santana de Oliveira  
João Carlos Nunes Bittencourt  
Deusdete Miranda Matos Junior  
Anderson Amorim do Nascimento  
Laue Rami Souza Costa de Jesus  
Georgina Gonzalez Rojas  
Rodrigo Carvalho Tutu  
Wagner Luiz Alves de Oliveira  
Silvano Moreira Junior

**DOI 10.22533/at.ed.87220080611**

**CAPÍTULO 12 ..... 127**

LOCALIZAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS EM AMBIENTE INTERNOS USANDO MARCOS FIDUCIAIS

Gabriel da Silva Santos  
Etevaldo Andrade Cardoso Neto  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.87220080612**

**CAPÍTULO 13 ..... 136**

AVALIAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE AMIDO COMO ADITIVO A LUBRIFICANTES

Matheus Gonçalves Leão de Oliveira  
Pollyana Grazielle Luz da Rocha  
Paulo Vitor França Lemos  
Denilson de Jesus Assis  
Adelson Ribeiro de Almeida Júnior  
Jania Betânia Alves da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.87220080613**

**CAPÍTULO 14 ..... 146**

UTILIZAÇÃO DE COATINGS DE QUITOSANA NA CONSERVAÇÃO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum*)

Luciano Pighinelli  
Anderson Rockenbach  
Pamela Persson  
Renata Cardoso Pospichil

**DOI 10.22533/at.ed.87220080614**

**CAPÍTULO 15 ..... 156**

ANÁLISE METALOGRAFICA DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO AISI 1050 USADO NA HASTE DE DIREÇÃO DE UMA MÁQUINA AGRÍCOLA DA SÉRIE 8R

Vagner dos Anjos Costa  
Fábio Santos de Oliveira  
Sílvio Leonardo Valença  
Gabriela Oliveira Valença  
Paulo Henrique de Souza Viana  
João Vítor Chaves Cordeiro

**DOI 10.22533/at.ed.87220080615**

<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>165</b>
EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE GALVANOPLASTIA NA CIDADE DE JUAZEIRO DO NORTE-CE	
<a href="#">Petronio Silva de Oliveira</a> <a href="#">José Laécio de Moraes</a> <a href="#">Francisco Evanildo Simão da Silva</a> <a href="#">Francisco Thiciano Rodrigues de Assis</a> <a href="#">Edyeleen Mascarenhas de Lima</a> <a href="#">Anderson Lima dos Santos</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>176</b>
ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO LUCAIA, SALVADOR-BA	
<a href="#">José Orlando Oliveira Moura Júnior</a> <a href="#">Nicole Caroline B. Santos Xavier</a> <a href="#">Thayna Santana de Lima</a> <a href="#">Alexandre Boleira Lopo</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>182</b>
QUALIDADES DO URBANO	
<a href="#">Franklin Soldati</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080618</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>199</b>
ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE CONFORTO TÉRMICO E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UNIDADE DE SAÚDE	
<a href="#">Gabriela Regina Rosa Galiassi</a> <a href="#">Ana Clara Alves Justi</a> <a href="#">Gabriel Henrique Justi</a> <a href="#">Maribel Valverde Ramirez</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>215</b>
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS	
<a href="#">Neilton dos Santos Seguins Costa</a> <a href="#">Vilson Souza Pereira</a> <a href="#">Dalmo Inácio Galdez Costa</a> <a href="#">Paulo César de Oliveira Queiroz</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>226</b>
TRANSPORTE DE CROMO (CR <sup>+3</sup> ) E NÍQUEL (NI <sup>+2</sup> ) EM CAMADA DE SOLO COMPACTADA	
<a href="#">Leonardo Ramos da Silveira</a> <a href="#">Newton Moreira de Souza</a> <a href="#">André Luis Brasil Cavalcante</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080621</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>241</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>242</b>

## CONSTRUÇÃO DE TURBINA DE TESLA E VALIDAÇÃO DE MODELO TEÓRICO

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 05/02/2020

### **Lucas Vinicius Capistrano de Souza**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/0313736122054812>

### **Leonardo Haerter dos Santos**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/4601034162292080>

### **Jader Flores Schmidt**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/1562087493047738>

### **Moises da Silva Pereira**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/5172318513169413>

### **Agnaldo Rosso**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/4424797943352801>

**RESUMO:** A crescente busca pela produção de energia elétrica a partir de fontes não esgotáveis, menos poluentes e de menor impacto ambiental trouxe à tona cenários que possibilitam o emprego de máquinas

geratrizes especiais, como a Turbina de Tesla. Neste trabalho é realizado o dimensionamento de uma Turbina de Tesla a partir do modelo teórico proposto por (COUTO H.S., 2006) e tratado no trabalho conduzido por (REMUS, 2011), projeto, construção e teste de uma Turbina do tipo de Tesla acionada por vapor d'água fornecido por uma caldeira à pressão de 5,9 bar, temperatura de 158 °C e vazão de m<sup>3</sup>/s, com o objetivo de validar o método teórico confrontando os resultados teóricos com os valores medidos em teste. No tocante ao projeto da turbina, a simplicidade mecânica e das peças e o pouco número de partes que a compõe contribui para que o modelamento tridimensional em CAD seja realizado com facilidade. Sobre a fabricação do protótipo, ressalta-se dois pontos: os discos que, por sua fina espessura, necessitam de um processo de corte especial (laser, plasma ou jato d'água) e o bocal injetor que acarreta certa complexidade devido a geometria interna. Mesmo tendo em conta o baixo rendimento do motor acoplado ao eixo da máquina para geração de energia, o baixo rendimento da caldeira, a falta de equipamento específico para medição de torque e a perda de carga global do sistema, obtém-se uma diferença de dezenas de vezes do valor de torque predito pelo

modelo teórico e o fornecido pelos testes, para estas condições. Estes valores, assim como a inconsistência do método exposta, corroboram a conclusão de que o referido modelo de predição avaliado não funciona de maneira confiável ou previsível.

**PALAVRAS-CHAVE:** Turbina de Tesla, geração, cogeração, rendimento.

## TESLA TURBINE CONSTRUCTION AND THEORETICAL MODEL VALIDATION

**ABSTRACT:** The growing search for the production of electricity from non-exhaustible, less polluting and less environmental impact sources, has brought to light scenarios that allow the use of special generating machines, such as the Tesla Turbine. In this work, is realized the sizing based on the theoretical model proposed by (COUTO HS, 2006) and treated in the work conducted by (REMUS, 2011), design, construction and testing of a Tesla-type Turbine driven by water vapor supplied by a boiler at a pressure of 5.9 bar, a temperature of 158 ° C and a flow rate of , in order to validate the theoretical method confronting the theoretical results with the values measured in test. With regard to the design of the turbine, the mechanical and parts simplicity and the small number of parts that compose it contribute to the three-dimensional modeling in CAD to be carried out with ease. Regarding the manufacture of the prototype, two points stand out: the discs, which, due to their thin thickness, need a special cutting process (laser, plasma or water jet) and the injector nozzle that causes some complexity due to the internal geometry. Even taking into account the low performance of the motor coupled to the machine shaft for power generation, the low efficiency of the boiler, the lack of specific equipment for torque measurement, the global loss of the system, is obtained a difference of dozens of times the torque value predicted by the theoretical model over the one provided by the tests, for these conditions. These values, as well as the exposed method inconsistency, corroborate the conclusion that the referred prediction model evaluated does not work in a reliable or predictable way.

**KEYWORDS:** Tesla Turbine, generation, cogeneration, efficiency.

## INTRODUÇÃO

Dentre os ramos da problemática energética que se observa atualmente, um deles é a falta de abastecimento de energia elétrica em propriedades rurais ou afastadas de grandes centros, ou mesmo em países cuja infraestrutura é precária. Em números, registros publicados em maio de 2019 pelo Banco Mundial, mais de 10% da população mundial não possui acesso à energia elétrica, sendo a maior concentração desta ocorrência na região da África Subsaariana (G1, 2019).

Outro detalhe é que, segundo um levantamento conduzido sobre as matrizes energéticas mundiais, ainda hoje a fonte mais comum nos processos de geração de energia são o petróleo, o carvão mineral e o gás natural (EPE, 2018) (REDAÇÃO, 2017), que além de estarem se esgotando, contribuem para a deterioração da qualidade dos recursos naturais necessários à vida humana.

A busca por novos meios de obtenção e aproveitamento de energia vem crescendo

exponencialmente nos últimos quinze anos e, com isso, também a ressurgência de ideias antigas que por várias razões, dentre elas, a falta de aplicabilidade ou necessidade existente à época, foram deixadas de lado.

Existem vários tipos de máquinas capazes de converter energia cinética de um fluido em energia mecânica, ou energia mecânica em energia cinética em um fluido, cuja utilização data de milhares de anos, empregadas por exemplo, em sistemas de irrigação e rodas hidráulicas pelos povos da Mesopotâmia e Roma antiga respectivamente (HENN, 2006).

Entra em cena então uma geratriz, nomeada Turbina de Tesla, cuja principal vantagem é a simplicidade de projeto quando comparada com as demais máquinas de fluido rotativas aplicadas em geração de energia elétrica. Por exemplo, sua montagem e manutenção possui tamanha facilidade que para realizá-los, não há necessidade de mão de obra especializada. Uma pessoa comum poderia operar tais tarefas com facilidade sem risco de danos ao equipamento por falta de conhecimento profundo (COURAS, 2009).

Outro fato que a coloca à frente das turbinas convencionais é a capacidade de ser aplicada em sistemas de cogeração de energia podendo trabalhar com gases provenientes combustão, biomassa, fluidos bifásicos, energia geotérmica e até mesmo contendo partículas abrasivas sem que isto cause prejuízo à máquina, devido ao seu princípio de funcionamento que a permite operar sob condições adversas (SENGUPTA & GUHA, 2012). Por esta e outras razões os estudos sobre a Turbina de Tesla vêm se popularizando, impulsionados pela busca por alternativas viáveis de cogeração de energia elétrica por meios mais limpos, sustentáveis e menos agressivo ao meio ambiente.

A partir do cenário supra exposto, o presente trabalho se desenvolve com o propósito de dimensionar, projetar, construir e testar um protótipo de Turbina de Tesla e validar o método teórico usado para concebê-la e a partir deste resultado, avaliar sua viabilidade de emprego em sistemas de cogeração e geração descentralizada de energia elétrica como um serviço de fornecimento auxiliar (a exemplo das placas fotovoltaicas) em centros urbanos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Turbina de Tesla tem como principal característica, que a diferencia dos demais tipos de máquinas de fluido geratrizes, o seu princípio de funcionamento, que utiliza a transferência de energia cinética do fluido de trabalho para os discos da turbina através dos efeitos da adesividade e viscosidade aerodinâmica (REMUS, 2011). Tal peculiaridade a torna uma máquina sem igual e que pode ser utilizada em condições onde nenhuma outra geratriz poderia (CAIRNS, 2003).

Basicamente, seu funcionamento se dá com a injeção de um fluido sobre um rotor composto de múltiplos discos acoplados a um eixo paralelamente, de tal maneira que o fluxo atinja o montante de discos tangencialmente. Assim, estando este rotor enclausurado, o fluido será forçado a escoar por entre os discos para chegar até as aberturas do sistema de descarga posicionado próximo ao eixo, na base dos discos (MANFRIDA, PACINI, &

TALLURI, 2017).

Há pouco mais de um século esta máquina não era sequer conhecida, mas graças aos esforços e trabalhos de desenvolvimento de Nikola Tesla, renomado inventor conhecido por suas contribuições no campo da eletricidade, este equipamento ganhou cota e aos poucos teve a atenção de estudiosos que a investigaram a fim de desvendar as características físicas e os fenômenos fluidodinâmicos que regem seu funcionamento (SENGUPTA & GUHA, 2012). Na Figura 1 é visto a patente original de Tesla.

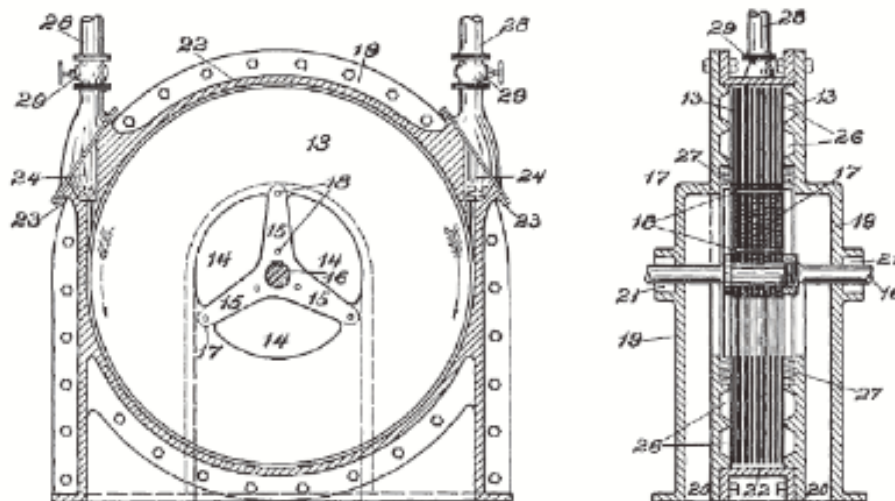


Figura 1: Desenho descritivo para patente da turbina de Tesla (Fonte: TESLA, N. Turbine. U. S. Patent Nº 1.061.206, 1913).

No que diz respeito às pesquisas, o alvo mais frequente dos estudos sobre a Turbina de Tesla, também conhecida como turbina de discos, são os influenciadores do rendimento tanto dos componentes isoladamente quanto global da máquina. Este dado está vinculado a muitas variáveis, que vão desde a temperatura do fluido de trabalho, tipo de fluido, até as geometrias do bocal de injeção, rotor, carcaça da turbina e sistema de descarga. Como sabido, o rendimento de uma máquina é de grande valia uma vez que é o parâmetro o qual pode definir quão viável é tal equipamento. Portanto, além dos diferentes métodos de cálculos propostos, alterações de geometria ou arranjo dos componentes estão sempre presentes nos trabalhos sobre turbina de discos, podendo ainda alguns fazerem sugestões atípicas como aplicação de ciclos térmicos especiais (caso do Ciclo Rankine Orgânico) (MANFRIDA, PACINI, & TALLURI, 2017) com o intuito de aumentar seu rendimento.

Na análise dos fenômenos internos da Turbina de Tesla, grande parte dos estudos sobre ela levam em consideração um gás ideal sob escoamento incompressível, em regime subsônico, com propriedades constantes e ausência de transferência de energia térmica, tornando o método de cálculo dos campos de escoamento simplificado (K.E. BOYD, 1968) (DEAM R.T., 2008) (SENGUPTA & GUHA, 2012). Porém, estas simplificações requerem atenção uma vez que podem culminar na super ou subestimação do potencial real da turbina.

Outro detalhe essencial é identificar o tipo de regime do escoamento interno predominante

(laminar ou turbulento) na turbina para que sejam aplicadas as equações corretas, pois quando o escoamento acontece em regime turbulento, por exemplo, pode ocorrer recirculação e, uma vez que as equações simplificadas (polinomiais pseudo-parabólicas geralmente utilizadas) não são aplicáveis para recirculação, sua influência acaba por não ser detalhada nos cálculos (SENGUPTA & GUHA, 2012).

Vale lembrar que o principal fator que influencia a definição do regime de escoamento da máquina é o espaço entre os discos (COUTO H.S., 2006), de maneira que na fase de projeto, obtido os valores correspondentes à espessura da camada limite e à potência gerada para cada regime de escoamento, escolhe-se qual será predominante no sistema.

Um detalhe importante é que com escoamento laminar, a rendimento do rotor pode atingir pelo menos 95% (RICE, 1991). Isso acontece às custas de aumentar a quantidade de discos e diminuir a vazão, o que resulta em um rotor maior. Para cada vazão existe um número de Reynolds otimizado para máxima eficiência. Com fluidos comuns, o espaço requerido entre os discos é drasticamente pequeno fazendo com que o fluxo laminar torne o rotor grande e pesado para uma taxa de vazão prescrita (RICE, 1991).

O método aplicado ao presente trabalho proposto por (COUTO H.S., 2006) tem como finalidade apenas a de prever o número de discos necessários para desenvolver a potência para realizar um trabalho prescrito (COUTO H.S., 2006). Como já mencionado, o uso de um método cujas equações não contemplam os fenômenos os quais influenciam o comportamento desta turbina (medidos e classificados pela ordem de magnitude) podem causar discrepâncias entre o resultado teórico e o real e, por tal motivo, este trabalho foi conduzido, para conhecer a proximidade entre os modelos teórico e real. Além do que, segundo (GUHA & SENGUPTA, 2012) e pesquisas correntes para elaboração deste artigo, não há registros encontrados de outros autores confrontando o método a partir de experimentação prática.

O presente trabalho deve ser considerado consequente do conteúdo teórico apresentado por (REMUS, 2011) e, portanto, o desenvolvimento matemático das equações aqui empregadas, porém não detalhadas, é nele encontrado.

## DESENVOLVIMENTO

Não há necessariamente uma sequência a ser seguida no dimensionamento, mas por convenção o projeto se inicia pelos componentes de entrada da turbina, seguindo como ordem os demais no caminho do fluido.

A obtenção das equações aqui aplicadas é encontrada no trabalho tido como base conduzido por (REMUS, 2011), título disponível nas referências bibliográficas.

Primeiramente, calcula-se as propriedades do fluido de trabalho na saída do bocal injetor.

Pressão:

$$p = \frac{597,82}{\left[1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2\right]^{(1,385-1)}} = 317,29 \text{ kPa}$$



Temperatura:

$$T = \frac{432,15}{1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2} = 362,23 \text{ K}$$

Massa específica:

$$\rho = \frac{3,17}{\left[1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2\right]^{\frac{1,385}{(1,385-1)}}} = 1,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

A área do bocal de injeção foi dimensionada a partir do diâmetro hidráulico do tubo de saída de vapor da caldeira, preservando esta medida a fim de diminuir a perda de carga no escoamento, totalizando  $4,12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Findada esta parte, é possível obter os valores referente a camada limite e quantidade de discos que comporá o rotor.

Espessura da camada limite laminar:

$$\delta_{D \text{ laminar}} = 5,48 \cdot \left(\frac{27,26 \cdot 10^{-6}}{902,68}\right)^{\frac{1}{2}} = 9,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Espessura da camada limite turbulenta:

$$\delta_{D \text{ turbulento}} = 0,376 \cdot \left(\frac{0,125 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6}}{902,68}\right)^{\frac{1}{2}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Área molhada:

$$Ua(\mathbf{n} - 1) = \frac{14,55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,68 \cdot 0,25} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Quantidade de discos:

$$\mathbf{n} = \frac{14,55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,68 \cdot 0,25 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} + 1 = 1,2$$

Devido ao valor não inteiro fornecido pela equação, busca-se geralmente o valor maior mais próximo. Neste caso será considerado três discos. Para tal, se faz necessário recalcular o valor do número de Reynolds, que será então de  $Re = 202,07$ .

A seguir é calculado a magnitude do torque, vazão e potência teóricos gerados pela turbina.

Para o regime laminar, os valores máximos de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{lmax} = 1,77 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^3 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 902,68)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 5,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{lmax} = 0,616 \cdot \pi \cdot 1,66 \cdot 0,125^4 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 902,68^3)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 0,34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{lmax} = 0,34 \cdot 902,68 = 304,66 \text{ W}$$

Para o regime laminar, os valores médios de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{lmed} = 1,77 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^3 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{lmed} = 0,616 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^4 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^3)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 0,12 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{lmed} = 0,12 \cdot 451,34 = 53,86 \text{ W}$$

Para o regime turbulento, os valores máximos de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{tmed} = 0,438(27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^4 \cdot 0,125^{13})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{tmed} = 0,073 \cdot 1,68 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^9 \cdot 0,125^{23})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 0,19 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{tmed} = 0,19 \cdot 451,34 = 85,48 \text{ W}$$

Para o regime turbulento, os valores médios de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{tmed} = 0,438(27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^4 \cdot 0,125^{13})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{tmed} = 0,073 \cdot 1,68 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^9 \cdot 0,125^{23})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 0,19 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{tmed} = 0,19 \cdot 451,34 = 85,48 \text{ W}$$

Conhecendo a magnitude das forças atuantes no sistema, pode-se então realizar a verificação de segurança dos componentes para construção.

O material utilizado para os discos foi um aço SAE1045. As propriedades do metal empregado no protótipo são encontradas no livro base para cálculo estrutural, (SHIGLEY, 1984), contido nas referências bibliográficas.

Tensão tangencial nos discos:

$$\sigma_t = \frac{7860 \cdot 1047^2}{4} \cdot [(3 + 0,30) \cdot 0,125^2 + (1 - 0,30) \cdot 0,0375^2] = 113,12 \text{ MPa}$$

Tensão radial:

$$\sigma_r = \frac{3+0,30}{8} \cdot 7860 \cdot 1047^2 \cdot (0,125 - 0,0375) = 27,19 \text{ MPa}$$

Tensão de ruptura no plano diametral:

$$\sigma_a = \frac{7860 \cdot 1047 \cdot (0,125^3 - 0,0375^3)}{(3 \cdot 0,125 - 0,0375)} = 4,29 \text{ MPa}$$

Com estes valores é possível obter a espessura mínima de cada disco.

$$e = \frac{0,66}{248,2 \cdot 10^6 \cdot 0,125 \cdot (0,125 - 0,0375) \cdot 3} = 8,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Devido ao valor ser pequeno tal que impossibilite a construção dos discos, uma espessura de 1,05 mm é considerada e utilizada para fabricação. É importante ressaltar que apesar desta alteração ser assumida por questões construtivas, a mesma não possui influencia alguma sobre o sistema.

Por fim, baseando-se no método de Soderberg, dimensiona-se o eixo e a chaveta do

rotor, respectivamente.

$$D_e = \left\{ \frac{32 \cdot 2}{\pi} \cdot \left[ \left( \frac{0}{Se} \right)^2 + \left( \frac{0,66}{295 \cdot 10^6} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Devido a limitação imposta pelas dimensões dos rolamentos utilizados no protótipo, o diâmetro menor do eixo será de  $8 \cdot 10^{-3}$  m.

$$L = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,66}{0,012^2 \cdot 310 \cdot 10^6} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Como o diâmetro interno dos discos são diferentes do diâmetro interno dos rolamentos, isto é, igual a 12 mm, o valor utilizado para o cálculo da chaveta foi este de 12 mm, pois é onde ela será instalada. Como o torque produzido pela turbina é baixo, o comprimento da chaveta, por consequência, será também pequeno. Assim, é construída uma chaveta especial para o protótipo nas dimensões 3x3x16,55 mm (valores de lado, altura e comprimento, respectivamente).

A estrutura externa (invólucro da turbina), formado pelo anel e as chapas metálicas laterais não se fazem passíveis de verificação, uma vez que estarão sob condição de esforço, carregamento e temperatura desprezíveis às suas dimensões e propriedades mecânicas.

## CONSTRUÇÃO E TESTE

Completa a fase de projeto do modelo, a construção se iniciou trabalhando os materiais brutos adquiridos. O anel invólucro, parte mais onerosa em tempo devido à sua dimensão e aos defeitos de forma, foi feito a partir de um tubo metálico comercial que passou por um processo de usinagem nos laboratórios da Universidade, e igualmente as tampas laterais.

A escolha pelos componentes em aço se deu pelo valor de aquisição, bastante inferior a outros como alumínio ou ligas especiais. Esta decisão acarretou certa dificuldade durante o processo de fabricação do protótipo pela massa elevada dos componentes e as suas dimensões e geometrias que estavam no limite do suportado pelas máquinas disponíveis.

Os discos, por serem muito finos, o que facilita que durante sua fabricação sejam avariados e empenados, foram doados por uma empresa especializada em corte a laser, junto com os espaçadores internos.

Um detalhe interessante são os rolamento utilizados na mancalização do eixo, que ao invés de serem de um tipo comercial aplicado ao uso em máquinas industriais, se trata de rolamentos especiais usados em skates e afins, os quais trabalham normalmente em rotações elevadas e condições ambientais severas, visto que em sua aplicação cotidiana estão sujeitos à poeira, detritos, líquidos e etc., e isto sem perder a capacidade de suportar carregamentos elevados. Ainda assim, pela simplicidade do equipamento, a massa a ser suportada por eles é desprezível se comparada à sua capacidade nominal.

O protótipo construído demorou algumas semanas até chegar ao estado da arte, pois não somente para este trabalho, foi pensado para ser modulável. Isto é, passível de alterações permitindo a continuidade do estudo, sendo de fácil montagem e desmontagem.

A Figura 2 mostra a forma final de cada componente e a Figura 3, o protótipo montado.

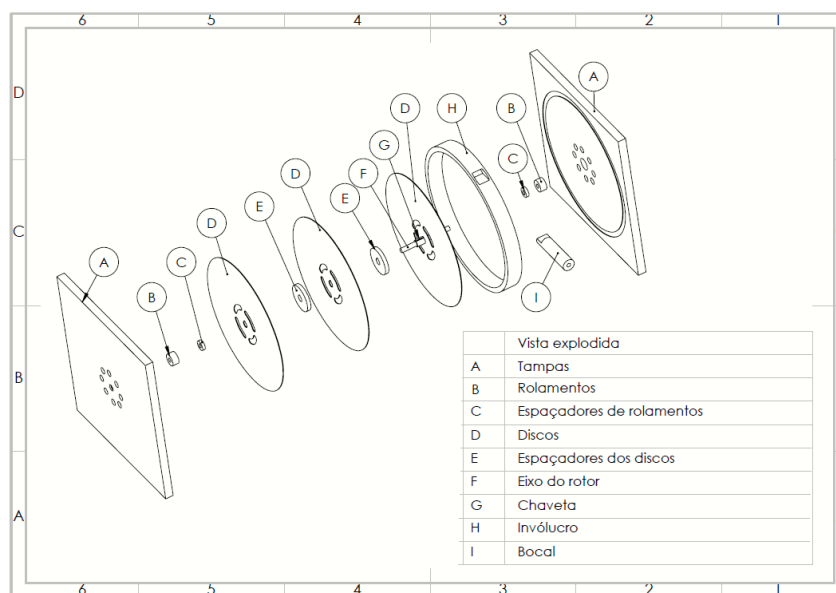


Figura 2: Vista explodida do protótipo.



Figura 3: Protótipo montado.

O teste consistiu em medir a potência disponibilizada pela turbina através de um motor de imã permanente acoplado ao eixo da turbina por um conjunto de polias e correia.

Vale ressaltar que foi utilizado um motor e não um gerador para o teste. Logo, o balanço entre energia mecânica disponível no eixo de entrada do motor e a energia elétrica disponibilizada no eixo de saída é prejudicado pelo baixo rendimento do mesmo (rendimento

não informado pelo fabricante).

Outro detalhe é que não dispúnhamos de aparatos para medir o torque diretamente no eixo da turbina, sendo necessário obtê-lo a partir da medição de potência gerada pelo motor, resultando em um valor aproximado.

## RESULTADOS

Os valores obtidos na medição são mostrados na Tabela 1.

	Valor	Unidade
Pressão da Caldeira	5,9	Bar
Rotação do motor	960	Rpm
Soma da Potência das lâmpadas	16	Watts
Tensão no Multímetro	10	Volts

Tabela 1: Valores medidos.

A partir destes, pôde-se também obter a corrente teórica gerada pelo motor, dividindo a potência pela tensão, resultando em 1,6 ampères. Assim, é possível obter uma aproximação da magnitude do torque gerado pela turbina nestas condições, conforme segue.

$$T = \frac{16}{(100,53 \cdot 9,32)} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$$

Sendo 9,32 correspondente à redução do sistema de transmissão.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao comparar os valores providos pela teoria com estes obtidos em teste, é visível uma diferença entre ambos. As equações aplicadas ao modelo sugerem um torque de, para estas condições e regime turbulento,  $6,6 \cdot 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}$  no eixo da turbina, ao passo que o valor real obtido foi de aproximadamente  $17, \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Posteriormente, um teste comparativo foi realizado utilizando ar como fluido de trabalho.

À pressão de 7,5 bar na linha de suprimento de ar comprimido, velocidade de rotação do motor de 886 rpm, foi medido com o auxílio de um multímetro digital, modelo o qual não dispúnhamos no primeiro teste com vapor, uma corrente de 1,53 A e tensão de 5,54 VCC, resultando em uma potência de aproximadamente 8,5 W e torque de  $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Na tabela 2 é possível visualizar o comparativo dos valores teórico e práticos.

	Teórico	Teste c/ Vapor	Teste com Ar
Rotação da Turbina (rad/s)	902,68	936,95	865
Torque da Turbina (N.m)			
Potência da Turbina (W)	595,34	16	8,5

Tabela 2: Comparação entre os valores teórico e práticos.

Na análise destas constatações deve-se destacar alguns fatores, tais como: perdas associadas às válvulas e tubulação que leva o vapor da caldeira até a turbina, perdas no sistema de transmissão, o motor o qual a aplicação não é apropriada a este fim e o intervalo de tempo pequeno para medição disponibilizado pela caldeira, cuja rendimento baixo não permite geração de vapor à pressão constante. Também o bocal injetor, que se mostrou um tanto complexo para ser fabricado devido a mudança de geometria interna, possui uma influência tal sobre a máquina que é classificado, como mostrado em inúmeros estudos conduzidos sobre a Turbina de Tesla, como o maior detrator de rendimento do sistema.

Somado a estas considerações, a falta de equipamentos apropriados para a medição de torque, pressão e vazão também possuem sua parcela de influência sobre os resultados.

Na investigação dos fatores que contribuem para tal discrepância de valores, enumeram-se:

1 – A teoria usada como base para o método proposto por Couto leva em consideração um escoamento livre, diferente da prática em que o escoamento ocorre sob enclausuramento;

2 – Ainda sobre a teoria base, a mesma modela um fenômeno contrário ao que ocorre na turbina. Ela trata de um disco girante sobre uma superfície de fluido em repouso, que transmite movimento ao fluido fazendo com que este acelere do centro do disco em direção à periferia, enquanto que na Turbina de Tesla ocorre o contrário: o fluido injetado transmite movimento aos discos em repouso ao passo que é forçado a fluir da periferia do discos em direção ao centro devido ao gradiente de pressão interna;

3 – A teoria proposta não leva em consideração perdas no sistema, de qualquer natureza, que possa influenciar o rendimento do equipamento;

4 – O método prediz um torque em regime turbulento maior do que quando em regime laminar, em desacordo com o a base teórica (para escoamento unidirecional) que propõe que o torque laminar é de maior magnitude em relação ao turbulento devido à diferença de espessura da camada limite, como visto pela Equação (1) e Figura 4:

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad \text{Equação (1)}$$

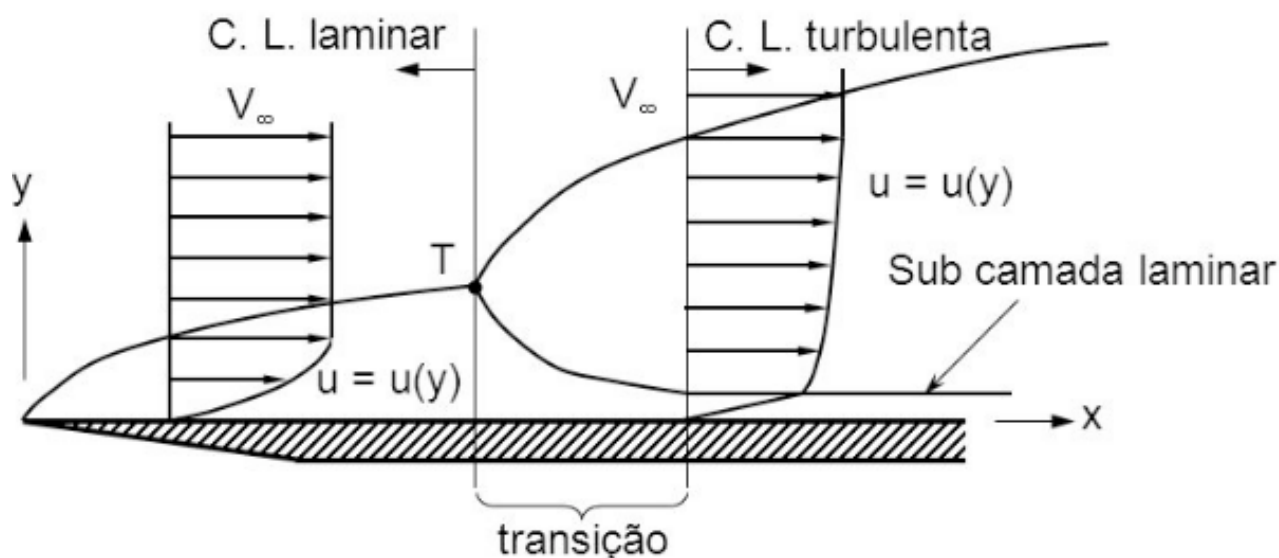


Figura 4: Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/5732728/>

5 – A equação que fornece o número de Reynolds e, portanto, caracteriza o regime de escoamento, não leva em consideração o espaçamento assumido entre os discos. Logo, o valor de Reynolds provido não possui relação alguma com as características construtivas que permitem ou não o desenvolvimento de um regime de escoamento ou outro.

## CONCLUSÃO

Os principais desafios na construção da turbina estão relacionados aos discos, que por sua espessura reduzida se faz necessário processos de fabricação e cuidados especiais no armazenamento, manuseio e montagem e ao bocal injetor, que se mostrou bastante complexo pela transição de geometria e processo de usinagem empregado para obtenção do mesmo. Ligado ao bocal e aos discos, o anel invólucro requer atenção no que diz respeito ao acabamento interno, pois qualquer imperfeição na superfície ou variação de raio pode danificar os discos que giram muito próximo dele e o furo que recebe o bocal, que deve ser perfeitamente posicionado na parte superior do anel de modo que o jato seja tangencial e incidente na altura do raio maior dos discos, com leve inclinação negativa a fim de direcionar o fluxo de maneira eficiente.

A grande capacidade volumétrica do reservatório, aliada ao baixo rendimento e elevada inércia térmica da caldeira aumenta o tempo de aquecimento para obtenção de vapor diminuindo o intervalo de tempo de fornecimento de vapor à pressão constante, que dificulta os testes e diminui a acuracidade das medições.

A carga imposta ao motor acoplado ao eixo da turbina, pelo banco de potência, não causou qualquer sinal de redução da velocidade de rotação, que estava a ser monitorada em tempo real através de um tacômetro digital. Isto mostra que a máxima capacidade de



geração da turbina nas condições de teste não foi alcançada, bem como o torque total que pode ser gerado.

A exposição de todas as influências físicas nos testes não justifica a magnitude da diferença entre os valores reais e teóricos, porém, a partir da constatação da inconsistência entre modelo de predição proposto e o fenômeno físico real ocorrente na turbina é possível compreender a não-concordância e concluir que o referido método não funciona de maneira confiável ou previsível.

## REFERÊNCIAS

- BATISTA, J. C. (2009). *Microgeração de Energia Elétrica (abaixo de 100 kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada*. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.
- CAIRNS, W. M. (2003). *The Tesla Disc Turbine (2 ed.)*. England: Camdem.
- COURAS, D. D. (2009). *Desenvolvimento Teórico-experimental de Um Modelo de Turbina de Tesla Aplicado À Geração Descentralizada Por Fontes Renováveis*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- COUTO H. S., S. P. (2005). *Análise de Tensões em Discos de Turbina do Tipo Tesla*. Fortaleza.
- COUTO H.S., D. J.-N. (2006). *The Tesla Turbine Revisited*. Sochi, Russia.
- DEAM R.T., L. E. (2008). *On Scaling Down Turbines to Millimeter Size*. ASME Trans J Eng Gas Turbines Power.
- EPE. (2018). *Matriz Energética e Elétrica*. Acesso em 2019, disponível em Empresa de Pesquisa Energética: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- G1. (2019). *G1 - ECONOMIA*. Acesso em Outubro de 2019, disponível em G1: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/05/22/mais-de-800-milhoes-de-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-a-energia-eletrica-diz-banco-mundial.ghtml>
- GUHA, A., & SENGUPTA, S. (2012). *The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine*. pp. 112 - 123.
- HENN, E. A. (2006). *Máquinas de Fluido (2ª ed.)*. Santa Maria: Ed. da UFSM.
- K.E. BOYD, W. R. (1968). *Laminar inward flow of an incompressible fluid between*. ASME Trans. J. Appl. Mechanics, (pp. 229–237).
- MAIDANA, C. F. (Maio de 2015). *Desenvolvimento de Turbinas de Múltiplos Discos: Estudo de Modelos Analíticos e Análise Experimental*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MANFRIDA, G., PACINI, L., & TALLURI, L. (2017). *A Revised Tesla Turbine Concept for ORC Applications*. pp. 1055 - 1062.
- REDAÇÃO. (2017). *Resumo de geografia: Fontes energéticas e suas relações econômicas*. Acesso em Maio de 2018, disponível em Guia do Estudante: <https://guiadoestudante.abril.com.br/estudo/resumo-de-geografia-fontes-energeticas-e-suas-relacoes-economicas/>
- REMUS, F. B. (2011). *Turbina de Tesla: Projeto Construtivo*. Universidade Luterana do Brasil, Canoas.

RICE, W. (1991). **Tesla Turbomachinery**. *Proc. IV Internacional Nikola Tesla Symposium*.

Schlichting, H., & Gersten, K. (2000). **The Boundary Layer Theory**. Springer.

SENGUPTA, S., & GUHA, A. (2012). **Analytical and computational solutions for three-dimensional flow-field**. pp. 344 - 353.

SHIGLEY, J. E. (1984). **Projetos de Engenharia Mecânica (3° ed., Vol. I e II)**. São Paulo: S.A.

WU, P. (1986). **Evaluation of Analytical Models for Multiple-Disk Pump Rotor Calculations**.

## ÍNDICE REMISSIVO

### B

Biopolímeros 137, 146, 147

### C

Coatings 146, 147, 148, 149, 150, 152, 153, 154, 155

Coeficiente de atrito 136, 137, 141, 144

Cogeração 50, 51, 90

Competitividade 77, 78, 81, 85, 86, 88, 94, 99

Computação verde 119

### D

Desenvolvimento sustentável 35, 36, 37, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 168

Desperdício 146, 147, 167

### E

Efluente líquido 165, 174

Energia 9, 1, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 35, 38, 39, 49, 50, 51, 52, 58, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 80, 84, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 114, 119, 167, 217, 230, 231

Expansão da geração 15, 18, 75, 76, 85

### F

FPGA 12, 118, 119, 121, 123, 124, 125, 126

### G

Galvanoplastia 165, 166, 167, 168, 175

Geração 9, 1, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 20, 24, 49, 50, 51, 60, 62, 69, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 85, 86, 87, 90, 91, 92, 167, 168, 184, 188

Gerador 1, 2, 5, 6, 9, 10, 47, 58, 76

### H

Hidrelétrica 1, 10, 79

### I

Inteligência artificial 109, 110, 113

### L

Leilões de transmissão 11, 15, 16, 17, 19, 21

Localização 12, 17, 30, 85, 87, 113, 127, 128, 127, 128, 133, 134, 171, 178, 202

### M

Manipulador-H 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108

Manutenção 6, 8, 10, 12, 21, 41, 51, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 76, 152, 158, 167, 185, 188, 189, 192  
Marcos fiduciais 127, 128, 129, 134  
Melhores práticas 77, 88, 89, 91, 100  
Mercado Livre 88, 99, 100  
Metalografia 156, 158, 159, 160  
Micromouse 109, 110, 111, 113, 166, 117  
Microscopia óptica 156  
Migração Sísmica 119  
Movelt 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108

## **N**

Nanolubrificante 136, 139, 141  
Nanopartículas de amido 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 144

## **O**

Open source 109, 110, 129  
Oportunidades 11, 13, 75, 88, 90, 95, 97, 134, 187

## **P**

PIR 35, 36, 37, 46, 47, 48  
Planejamento energético 35, 36, 38, 44, 46, 47, 48  
Project Finance 11

## **Q**

Qitosana 146, 147, 148, 149, 150, 152

## **R**

Rendimento 49, 50, 52, 53, 58, 60, 61  
Repotenciação 1, 3, 8, 9, 10  
Risco 4, 15, 51, 67, 76, 79, 86, 87, 88, 89, 92, 93, 95, 97, 99, 228  
Robótica 9, 101, 102, 103, 107, 109, 110, 111, 112, 117, 127, 128, 135  
Robótica móvel 110, 109, 128  
ROS 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 115, 116, 117, 129  
RTM 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125

## **S**

Setor elétrico 11, 13, 15, 22, 24, 29, 35, 36, 41, 45, 47, 75, 76, 77, 85, 98, 99  
Simulação 17, 25, 34, 93, 94, 95, 96, 104, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 127, 129, 130, 132, 216, 226  
Smart Grid 64, 70  
Supercapacitor 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74  
Supercomputação 119  
Sustentabilidade 9, 64, 99

## T

Taxa de desgaste 136, 139, 143, 144

Térmicas 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 96, 209, 214

Tratamento 38, 128, 158, 156, 160, 163, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 180, 229

Turbina de Tesla 49, 50, 51, 52, 60, 62

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**