



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
JOÃO DALLAMUTA  
MARCELO HENRIQUE GRANZA  
(ORGANIZADORES)

# A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

**Atena**  
Editora  
Ano 2020



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
JOÃO DALLAMUTA  
MARCELO HENRIQUE GRANZA  
(ORGANIZADORES)

# A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

 **Atena**  
Editora  
Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Geraldo Alves

**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**

Profª Drª 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

Profª Drª 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. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª 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

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

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

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

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

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª 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

Profª Drª 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

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  
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  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
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  
Profª Drª 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  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª 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. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
 Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
 Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
 Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
 Profª 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. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
 Profª 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. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
 Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
 Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
 Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
 Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
 Prof. Me. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
 Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
 Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
 Profª Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
 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  
 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. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá  
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
 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

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

P964 A produção do conhecimento na engenharia elétrica 2 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta, Marcelo Henrique Granza. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

Formato: PDF  
 Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
 Modo de acesso: World Wide Web  
 Inclui bibliografia  
 ISBN 978-65-86002-65-2  
 DOI 10.22533/at.ed.652202303

1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João. III. Granza, Marcelo Henrique.  
 CDD 623.3

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

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

## APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na engenharia elétrica que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Algo desafiador para pesquisadores e engenheiros de produto.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
Marcelo Henrique Granza

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE TURBINAS EÓLICAS EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO MATLAB/SIMULINK NA APRENDIZAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE	
Marcos José dos Santos Junior Vlademir Ap. Freire Junior Marcelo Henrique Granza João Luiz Dallamuta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023031</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
RECONHECIMENTO DE DÍGITOS EM IMAGENS DE MEDIDORES DE ENERGIA NO CONTEXTO DE UM APLICATIVO DE AUTOLEITURA	
Arthur Costa Serra João Vitor Ferreira França Ricardo Costa da Silva Marques Wesley Kelson Ribeiro Figueredo Artur Bernardo Silva Reis Italo Francyles Santos da Silva Simara Vieira da Rocha Aristófanés Correa Silva Eliana Márcia Garros Monteiro Italo Fernandes Serra da Silva Marcia Izabel Alves da Silva José Messias dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023032</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
O CONCEITO DE CASA INTELIGENTE APLICADO A PAÍSES DESENVOLVIDOS E EMERGENTES: BENEFÍCIOS, BARREIRAS E GRAU DE ADESÃO	
Florença Moraes da Silva Rosana Aparecida Ferreira Nunes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023033</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO	
Igor Ferreira Visconti	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023034</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA	
Périson Pavei Uggioni André Roberto de Sousa Anderson Daleffe Diego Tiburcio Fabre	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023035</b>	

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>58</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY E ALGORITMOS DE APRENDIZADO PARA SEQUÊNCIA DE PARTIDA DE PLANTAS INDUSTRIAIS	
André da Silva Barcelos Fábio Muniz Mazzone	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023036</b>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>72</b>
SIMULAÇÃO DE SINTONIZAÇÃO DE AUTOMÁTICA PARA UM CONTROLADOR PID EM UMA PLANTA NÃO-LINEAR USANDO ALGORITMO GENÉTICO	
Diogo Aparecido Cavalcante de Lima Hiago Araújo Silva Alexandre Carvalho Silva Maurício José Aureliano Júnior Alexandre Cardoso Edgard Afonso Lamounier Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023037</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>82</b>
CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO PARA UM ROBÔ PARALELO COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CONFECCIONISTA	
Asafe dos Santos Silva Acarcio Gomes de Almeida Júnior Alexander Patrick Chaves de Sena João Manoel Freitas Souza José Lucas Moreira Cavalcanti de Abreu	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023038</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>95</b>
DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA DE CONTROLE HÍBRIDA PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE ALTA PRESSÃO	
Murilo Ferreria Vitor Alexsandro dos Santos Silveira Guilherme Matias Rodolfo César Costa Flesch	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023039</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>110</b>
UMA NOVA ABORDAGEM DE UM SIMULADOR VIRTUAL DE IDENTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA BASEADO NA METODOLOGIA DE SISTEMAS INTELIGENTES INSERIDO NO CONTEXTO DE REDES NEURAIS	
Matheus Silva Pestana Orlando Donato Rocha Filho Danúbia Soares Pires	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230310</b>	
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>124</b>
INFLUÊNCIA DO ERRO DE QUANTIZAÇÃO APLICADO NO CONTROLE DIGITAL DE VELOCIDADE DE UM MÓDULO SERVOMECANISMO DIDÁTICO	
Vlademir Ap. Freire Junior Marcelo Henrique Granza	

João Luiz Dallamuta

**DOI 10.22533/at.ed.65220230311**

**CAPÍTULO 12 ..... 135**

**CRIAÇÃO DE UM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS EM UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Edilberto Pereira Teixeira

Luciano Rangel Pinheiro Neto

**DOI 10.22533/at.ed.65220230312**

**CAPÍTULO 13 ..... 147**

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO**

Pablo Rodrigues Lopes

Rui Bertho Junior

**DOI 10.22533/at.ed.65220230313**

**CAPÍTULO 14 ..... 159**

**MODELAGEM INTELIGENTE NEBULOSA APLICADA À HIDROPONIA VIA SISTEMA EMBARCADO**

Kayon Vinicius Lima Lopes

Danúbia Soares Pires

Orlando Donato Rocha Filho

**DOI 10.22533/at.ed.65220230314**

**CAPÍTULO 15 ..... 172**

**MODELO DE NEURÔNIO MEMRISTIVO DE DIÓXIDO DE VANÁDIO COM CODIFICAÇÃO DE IMPULSOS PRBS-PWM**

Rennan Santos de Araujo

Luiz Alberto Luz de Almeida

Felipe Sadami Oiwa da Costa

**DOI 10.22533/at.ed.65220230315**

**CAPÍTULO 16 ..... 187**

**MODELO MISO NEBULOSO COM ESTRUTURA MAMDANI APLICADO À ANÁLISE E CONTROLE DE VAZÃO HÍDRICA**

Lorena Maria Figueiredo Albuquerque

Kayon Vinicius Lima Lopes

Orlando Donato Rocha Filho

Danúbia Soares Pires

**DOI 10.22533/at.ed.65220230316**

**CAPÍTULO 17 ..... 199**

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AVALIAÇÃO DE ENGENHARIA COGNITIVA EM *SERIOUS GAMES***

Mateus Gomes Binatti

Marcos Venícios Conceição de Araújo

Pollyana Coelho da Silva Notargiacomo

**DOI 10.22533/at.ed.65220230317**

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>209</b>
FILTRO DE KALMAN BASEADO EM MODELO FUZZY TAKAGI – SUGENO VIA ANÁLISE ESPECTRAL DE DADOS EXPERIMENTAIS	
Daiana Caroline dos Santos Gomes Ginalber Luiz de Oliveira Serra	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230318</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>224</b>
CONSTRUÇÃO, DESIGN DE CONTROLE E CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR BLUETOOTH DE UM ROBÔ AUTO EQUILIBRANTE	
Giulio Cesare Mastrocinque Santo Claudio Garcia	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230319</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>240</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>241</b>

## UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE TURBINAS EÓLICAS EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO MATLAB/SIMULINK NA APRENDIZAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE

Data de aceite: 17/03/2020

### Marcos José dos Santos Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR – *Campus* Guarapuava  
marcosj@alunos.utfpr.edu.br

### Vladimir Ap. Freire Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR – *Campus* Guarapuava  
vlademirjunior@utfpr.edu.br

### Marcelo Henrique Granza

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR – *Campus* Guarapuava  
marcelogranza@utfpr.edu.br

### João Luiz Dallamuta

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR – *Campus* Guarapuava  
joaol@utfpr.edu.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma abordagem alternativa no estudo considerando fontes de energias renováveis, em específico na estratégia de controle de velocidade de emuladores de aerogeradores, através da utilização de modelos matemáticos de turbinas eólicas. O estudo de fontes de energias renováveis está cada vez mais em evidência em diversos países devido a degradação ambiental, mudanças climáticas e diminuição das reservas de combustíveis fósseis. Porém,

para extrair o máximo de energia de sistemas eólicos são necessárias tecnologias avançadas e mão de obra qualificada. Em vista disto, é de suma importância que alunos de graduação de cursos de engenharia estudem e tenham contato prático com tais sistemas. Contudo, o alto custo e a complexidade na construção de aerogeradores tornam-se uma dificuldade no estudo de fontes de energias eólicas. Neste contexto, a utilização de modelos matemáticos que descrevem a dinâmica de funcionamento de turbinas eólicas, implementadas em ambientes de simulação Matlab/Simulink®, são uma alternativa no estudo de estratégias de controle aplicadas em tais sistemas, proporcionando aos alunos uma visão conceitual, funcional e operacional de turbinas eólicas utilizadas na geração de energia elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Eólica, Turbina Eólica, Modelos Matemáticos, Controlador PI.

### USE OF MATHEMATICAL MODELS OF WIND TURBINES IN MATLAB / SIMULINK SIMULATION ENVIRONMENT IN THE LEARNING OF CONTROL SYSTEMS

**ABSTRACT:** This work presents an alternative approach in the study considering renewable energy sources, specifically in the strategy of speed control of aero generator emulators,

through the use of mathematical models of wind turbines. The study of renewable energy sources is increasingly in evidence in several countries due to environmental degradation, climate change and reduction of fossil fuel reserves. However, to extract the maximum energy from wind systems, advanced technologies and qualified manpower are required. In view of this, it is of the utmost importance that graduate students of engineering courses study and have practical contact with such systems. However, the high cost and complexity in the construction of aero generators become a difficulty in the study of sources of wind power. In this context, the use of mathematical models that describe the dynamics of wind turbines, implemented in Matlab/Simulink® simulation environments, is an alternative in the study of control strategies applied in such systems, providing students with a conceptual, functional and operational view of wind turbines used in electric power generation.

**KEYWORDS:** Wind Power, Wind Turbine, Mathematical Models, PI Controller.

## 1 | INTRODUÇÃO

Fontes de energias renováveis e inesgotáveis são de extrema importância para um desenvolvimento sustentável em diversos países, sendo importante não só o estudo de tais fontes, mas também o estímulo a consciência ambiental. Nesse cenário, a energia eólica aparece como uma alternativa de geração, sendo uma fonte renovável de baixo impacto ambiental.

A geração eólica está em grande ascensão no cenário nacional, segundo dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2016), de agosto a dezembro de 2015, as usinas eólicas brasileiras aumentaram a capacidade instalada em 23%, com 56 novos parques, totalizando 361 empreendimentos eólicos em todo o país, gerando cerca de 8,9 GW o que representa 6,15% de toda geração nacional. Podendo ainda atingir 18,8 GW de geração eólica até 2019 a uma taxa de crescimento anual média de 20%, sendo esta taxa de 46% em 2015, valor mais elevado entre as maiores potências eólicas mundiais.

A energia eólica oferece uma potência variável muito consistente de ano para ano, mas que apresenta variações significativas em escalas de curto tempo. Por isso, é usado em conjunto com outras fontes de energia para fornecer uma fonte confiável. (HOLTTINEN, et al. 2006). As variações instantâneas de potência nos aerogeradores, causadas por rajadas de vento, também impactam em seus principais parâmetros de saída, como a potência instantânea, tensão e frequência. Tais características fazem os aerogeradores sistemas altamente dependentes de estratégias de controle eficientes, estratégias estas que precisam ser matematicamente modeladas e simuladas durante seu projeto.

Para extrair o máximo desse potencial eólico nacional é preciso tecnologia avançada e mão de obra qualificada. Porém, o alto custo e a complexidade na

construção de aerogeradores é uma das dificuldades no estudo de fontes eólicas, tornando praticamente inviável o contato prático de alunos de graduação com tais tecnologias.

Para preparar o aluno para a realidade do mercado de trabalho, considerando a tecnologia avançada e a necessidade de qualificação de mão de obra, esse trabalho propõe o uso do Matlab® como ferramenta para simplificar o aprendizado de sistemas eólicos.

Neste sentido, a implementação de modelos matemáticos que descrevem a dinâmica de funcionamento de uma turbina eólica em ambiente Matlab/Simulink® permite aos estudantes o perfeito entendimento do funcionamento de aerogeradores possibilitando também o estudo de estratégias de controle para que tais sistemas operem dentro de dinâmicas aceitáveis.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um aerogerador pode ser descrito como um conjunto capaz de gerar energia elétrica através da energia cinética dos ventos, desde a turbina eólica até a saída de um gerador que pode ou não estar conectado à rede elétrica. Figura 1 apresenta um conjunto aerogerador.

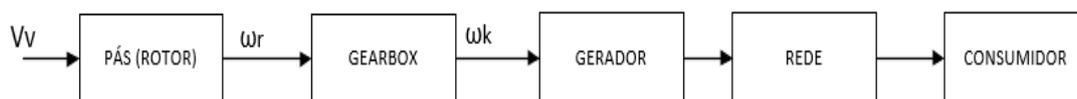


Figura 1 - Conjunto de um aerogerador

Dentro do estudo de um aerogerador várias áreas de conhecimento são aplicadas como a aerodinâmica, sistemas de transmissões mecânica, sistemas elétricos e ainda em alguns casos um complexo sistema eletrônico para obter o máximo rendimento de conversão de energia cinética dos ventos para energia elétrica.

Nota-se na Figura 1 que até a caixa multiplicadora de velocidade (*gearbox*) temos um sistema totalmente mecânico, e como todo sistema mecânico é possível modelá-lo através de equações matemáticas que demonstram seu comportamento variando seus parâmetros.

De acordo com Heier (1998), a energia cinética ( $E_c$ ) contida nos ventos é em função da densidade ( $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ ) e velocidade ( $V_v$ ) do vento e pode ser obtida através da seguinte equação.

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V_v^2 \quad (1)$$

A potência total contida nos ventos é dada pela Equação 2. Onde além da densidade e velocidade do vento, a potência também é dada em função do raio de circunferência ( $R$ ) formado pela rotação das pás, essa circunferência representa a área varrida pelas mesmas, dada pela Equação 3. Neste trabalho será usado um raio de pá igual a 2 m.

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (2)$$

$$A = \pi R^2 \quad (3)$$

## 2.1 Modelagem da turbina eólica

Para saber ao certo o quanto um aerogerador pode converter de energia eólica em energia mecânica é necessário o uso da Lei de Betz, que afirma que o coeficiente de potência ( $C_p$ ) limita a potência total extraída por um aerogerador em 59,3%. Portanto, a equação de potência mecânica de uma turbina eólica, apresentada na Equação 4, revela que a potência extraída pela mesma é limitada pelo coeficiente de potência..

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_v^3 \quad (4)$$

Os valores do coeficiente de potência ( $C_p$ ) são obtidos em função do ângulo de ataque das pás ( $\beta$ ) e a relação entre a velocidade angular de ponta de pá e a velocidade do vento ( $\lambda$ ).

A relação entre a velocidade angular das pás e a velocidade do vento é dada pela seguinte Equação 5.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_v} \quad (5)$$

Onde  $\omega$  é a velocidade angular das pás. Após obter ambos os dados, é possível saber o quanto a turbina poderá extrair de energia mecânica dos ventos calculando o coeficiente de potência ( $C_p$ ). O coeficiente de potência pode ser calculado a partir da Equação 6, onde os coeficientes  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  e  $c_6$  são valores obtidos empiricamente considerando uma turbina moderna.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (6)$$

Onde o valor de  $\lambda_i$  é dado pela Equação 7.

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (7)$$

De acordo com (GRANZA & VOLTOLINI, 2010), os valores comumente utilizados para os coeficientes são:  $c_1 = 0,5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0,4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$  e  $c_6 = 0,0068$ .

Sendo assim é possível chegar em um modelo que forneça a velocidade angular máxima ( $\omega_r$ ) de saída da turbina a partir do ângulo de inclinação das pás ( $\beta$ ) e velocidade do vento ( $V_V$ ). Resolvendo a Equação 5 para  $\omega$ , pode-se obter a velocidade angular máxima, que será utilizada como velocidade de referência ( $\omega_r$ ), em função da velocidade do vento que incide na turbina, raio da turbina e um valor conhecido do ângulo  $\lambda$  para extrair uma máxima potência do gerador, conforme Equação 8.

$$\omega_r = \frac{\lambda_{max}}{R} V_v \quad (8)$$

Em ambiente de simulação, foram implementadas as equações que regem o comportamento dinâmico da turbina eólica. Na Figura 2 é possível visualizar os diferentes valores do coeficiente de potência ( $C_p$ ) para diferentes valores de ( $\beta$ ) e ( $\lambda$ ).

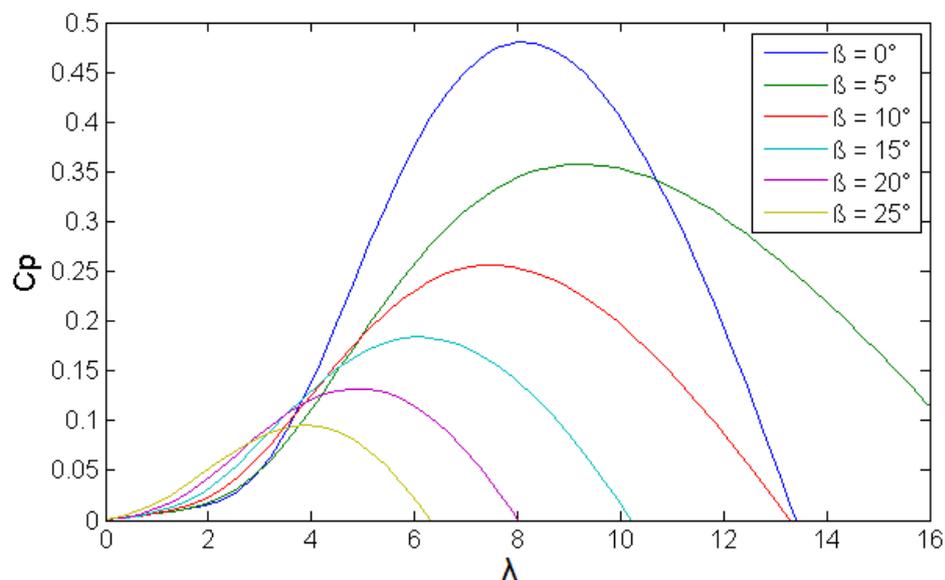


Figura 2 - Coeficiente de potência para um aerogerador moderno

Através da Tabela 1 é possível verificar os valores de  $\lambda_{max}$  e  $C_p$  obtidos a partir da Figura 2 .

$\beta$	$\lambda_{max}$	$C_p$
0	8,10	0,4801

5	9,23	0,3576
10	7,49	0,2561
15	6,08	0,1840
20	4,90	0,1325
25	3,87	0,0952

Tabela 1 - Valores de  $\beta$  e  $\lambda$  para um  $C_p$  máximo

Com isso foi obtido os valores da relação entre a velocidade angular das pás e a velocidade do vento para que o coeficiente de extração de potência mecânica seja máximo em um aerogerador com ângulos de inclinação das pás pré-determinados.

## 2.2 Estratégia de Controle

Para permitir que o sistema opere dentro de uma dinâmica aceitável, foi utilizado um controlador do tipo PI que reúne as ações de controle proporcional e integral. Na ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador e o sinal de erro é apenas um ganho. Já a ação integral vai atuar no processo ao longo do tempo enquanto existir diferença entre o valor desejado e o valor medido. Assim, o sinal de correção é integrado no tempo.

A equação do controlador PI é exibida na Equação 9 (OGATA, 2003).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad (9)$$

onde  $u(t)$  é a saída do controlador,  $e(t)$  é o sinal de erro e  $K_p$  é o ganho proporcional e  $T_i$  é o tempo integrativo. A função de transferência do controlador PI é dada como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (10)$$

## 3 | RESULTADOS

Para que seja possível a simulação do sistema, o modelo da turbina eólica foi implementado em diagrama de blocos conforme a Figura 3, em ambiente Simulink/Matlab® juntamente com os parâmetros para que o aerogerador tenha um rendimento máximo dentro da sua dinâmica de operação. Tais valores foram exibidos na Tabela 1, onde nas simulações foi utilizado o valor de  $\lambda = 8,1$  para um  $\beta = 0$  pois apresentou o maior valor de  $C_p$ .

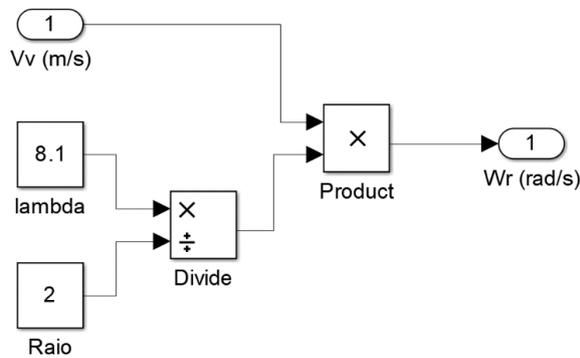


Figura 3 – Modelo da Turbina Eólica

Uma alternativa muito utilizada para que seja possível o estudo de turbinas eólicas na prática é a utilização de motores de corrente contínua (CC) controlando sua velocidade para que operem na mesma velocidade angular de saída da turbina ( $w_r$ ), assim, emulando seu comportamento a partir de seu modelo matemático. Partindo dessa consideração, porém, em ambiente virtual foi considerando um modelo de motor CC fornecido pelo Simulink. O modelo utilizado é ilustrado através da Figura 4.

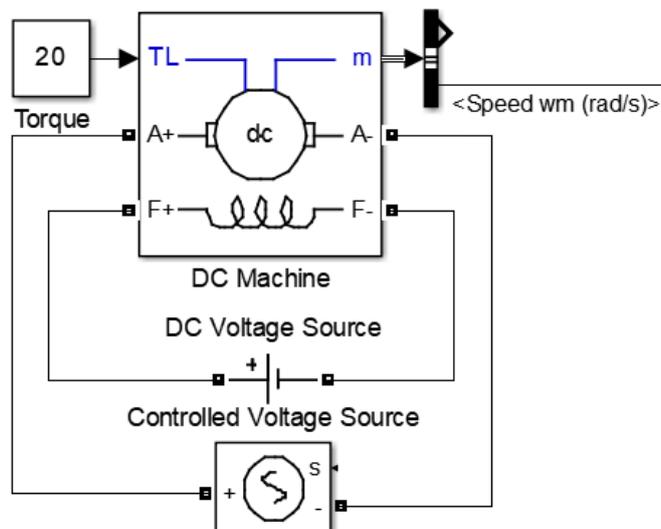


Figura 4 - Modelo do Motor CC

Para utilizar o modelo do motor CC é necessário configurar três parâmetros, sendo eles a tensão de armadura, tensão de campo e torque. Considerando a tensão de campo e o torque como constantes, pode-se controlar a velocidade angular do motor controlando apenas sua tensão de armadura.

Assim a considerando o modelo matemático da turbina eólica, e o controlador PI, chega-se no diagrama de blocos de controle de velocidade do motor CC, conforme ilustrado pela Figura 5.

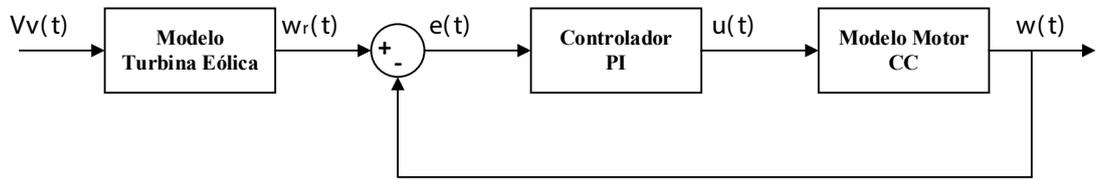


Figura 5 - Diagrama de blocos de controle de velocidade

Onde  $Vv(t)$  é a velocidade de entrada do vento,  $w_r(t)$  é a velocidade angular de referência de saída do modelo,  $e(t)$  sinal de erro,  $u(t)$  a ação de controle e  $w(t)$  a velocidade angular de saída do motor.

### 3.3 Identificação e Sintonia do Sistema

Para obtenção dos ganhos do controlador PI que possibilite que o sistema opere dentro de uma dinâmica aceitável, foi realizada a identificação e sintonia do sistema utilizando métodos tradicionais da literatura juntamente com a ferramenta Sisotool do MATLAB®. Aplicando um degrau de  $4 \text{ m/s}$  de velocidade de vento de entrada em malha aberta, considerando o método de identificação de Bróida (HAMITI, 1996), o sistema apresentou a curva de identificação, conforme Figura 6.

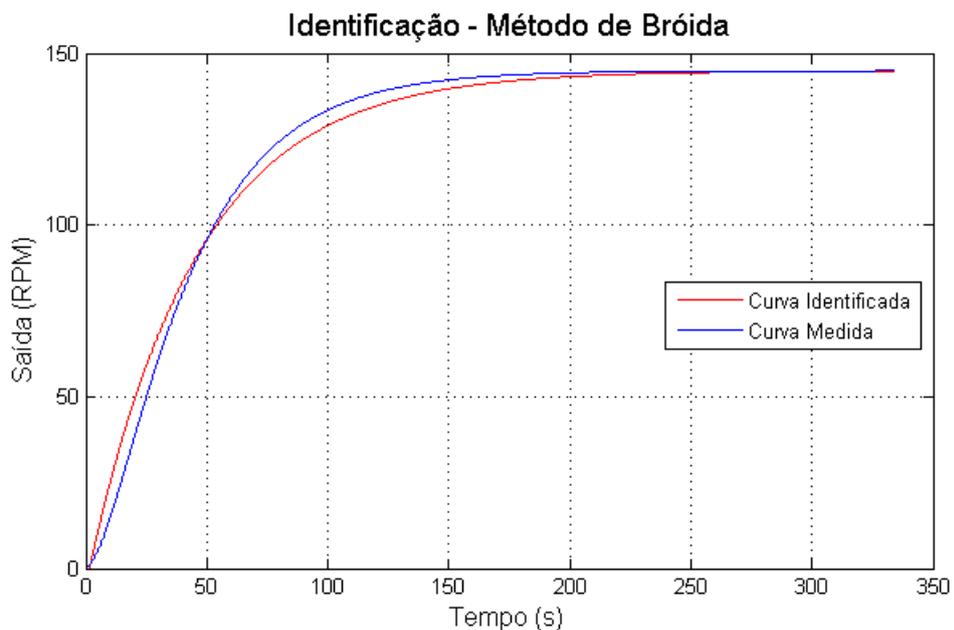


Figura 6 - Curva obtida em malha aberta

Chegou-se na função de transferência a seguir:

$$G(s) = \frac{0,7245}{44,74s + 1} e^{1,63s} \quad (11)$$

Utilizando a ferramenta *Sisotool* do Matlab® considerando a Equação 11, foram obtidos os seguintes parâmetros:

$$K_p = 1,6644 \quad (12)$$

$$T_i = 5,8018 \quad (13)$$

Após identificação e estimação de parâmetros para o controlador PI, foi realizado um ensaio em malha fechada conforme Figura 7, onde foram aplicados degraus de até  $20 \text{ m/s}$  de velocidade de vento possibilitando verificar o comportamento do sistema tanto na aceleração quanto na desaceleração.

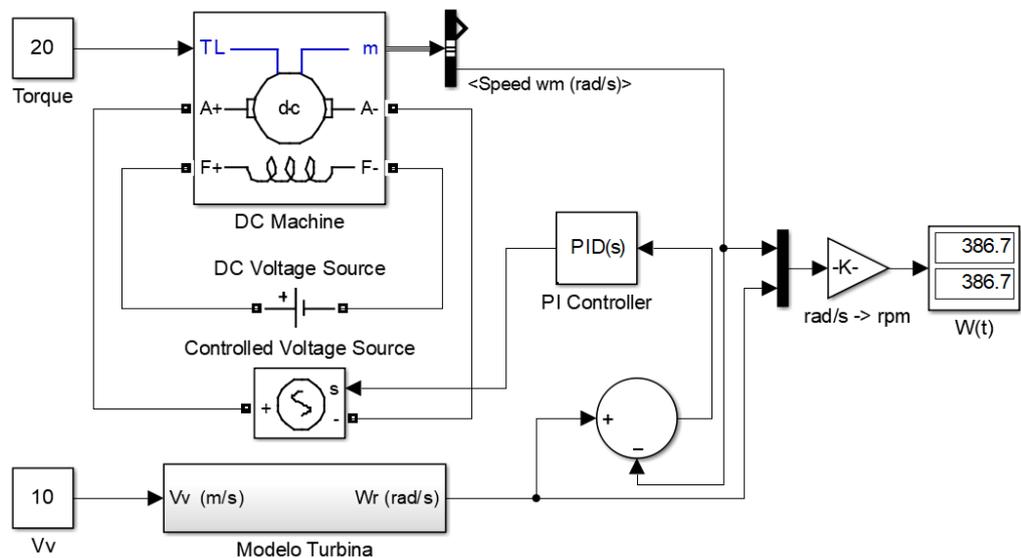


Figura 7 – Modelo do sistema em malha fechada

O resultado obtido é ilustrado na Figura 8.

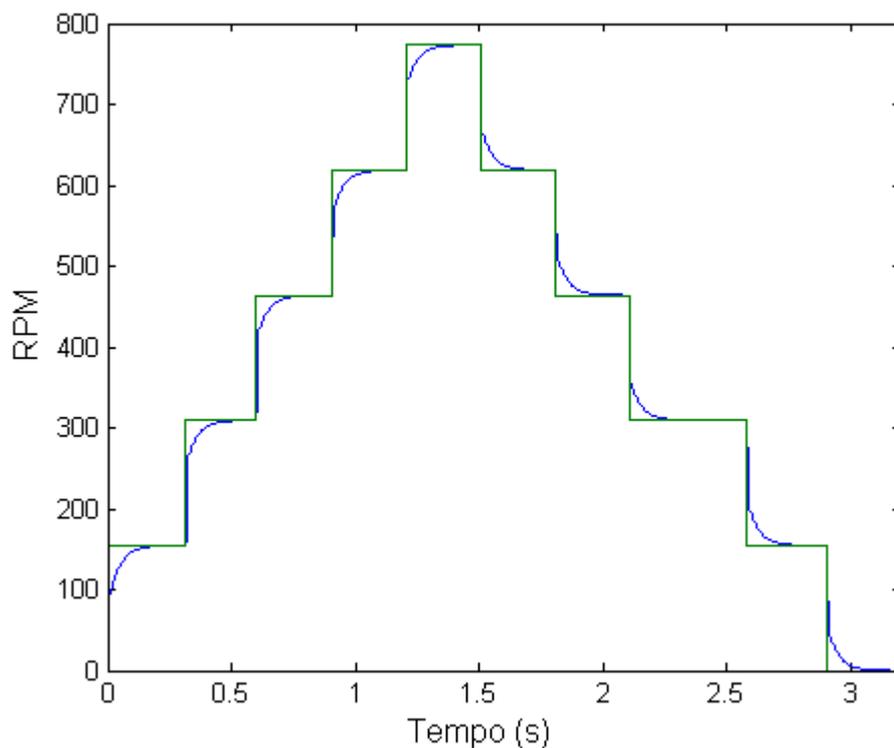


Figura 8 - Curvas obtidas em malha fechada

Nota-se através da Figura 8 que a estratégia de controle aplicado no controle de velocidade apresentou resultado satisfatório operando de uma dinâmica aceitável, visto que o sistema atingiu a velocidade referência tanto nos degraus de aceleração quanto nos degraus de desaceleração.

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi utilizado o software Matlab/Simulink® como uma ferramenta pedagógica que pode ser utilizada no estudo de aerogeradores e estratégias de controle. Foi apresentada uma abordagem alternativa no estudo considerando fontes de energias renováveis, em específico na estratégia de controle de velocidade de emuladores de aerogeradores, através da utilização de modelos matemáticos de turbinas eólicas aplicados em ambientes de simulação.

A utilização de ambientes de simulação tem grande vantagem no aprendizado, pois além de permitir um entendimento e contato com equipamentos utilizados em ambientes industriais, apresentam baixo custo e tornam acessível o estudo de aspectos gerais das mais variadas áreas da engenharia ou até mesmo específicos como sistemas de controle, evidenciando a aplicabilidade de conceitos interdisciplinares como utilização de equações matemáticas na realização de tarefas reais.

## REFERÊNCIAS

BAZZO, T. Implementação de controle vetorial em geradores assíncronos. 2007.

COSTA, E. M.; SANTOS, B. S. DOS; VOLTOLINI, H. Simulação de um sistema eólico considerando a dinâmica da turbina eólica e multiplicador de velocidade. 2011.

GRANZA, M. H.; VOLTOLINI, H. Modelagem e simulação de um aerogerador a velocidade constante. 2010.

HAMITI, K. Position control of a pneumatic actuator under the influence of suction, Elsevier Science Ltd pp. 1079-1088. 1996.

HEIER, S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998.

HOLTTINEN, Hannele; et al. "Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power". IEA Wind Summary Paper, Global Wind Power Conference 18–21 September 2006, Adelaide, Australia.

MOREIRA, V. VOLTOLINI, H. GRANZA, M. Implementação do modelo de uma turbina eólica baseado no controle de torque do motor C utilizando ambiente Matlab/Simulink via Arduino. 2012.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª Edição. LTC. Rio de Janeiro. 2000.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Abrasômetro 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56

Adesão 23, 31, 32

Ajuste automático 72, 190

Algoritmo genético 36, 37, 42, 47, 72, 73, 75, 76, 78, 79, 80, 81

Aprendizado de máquina 12

Aprendizagem de máquinas 58, 176

Arquitetura paralela 83, 84

Autoleitura 11, 12, 13, 14, 21

Automação 49, 51, 53, 56, 59, 60, 81, 95, 109, 124, 133, 135, 137, 151, 153, 157, 161, 170, 187, 198

Avaliação experimental 96, 109

### B

Barreiras 23, 32, 33

### C

Calorímetro de alta pressão 96

Casas inteligentes 23, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 33

Consumo de energia 12, 13, 14

Controlador fuzzy 135, 142, 143, 145, 146

Controlador PI 1, 99, 124, 131

Controlador PID 72, 74, 75, 79, 81

Controle de processos 135, 136

Controle híbrido 95, 97, 99, 102, 105, 107, 108

Controle PID 74, 78, 83

### E

Energia eólica 1, 2, 4

Erro de quantização 124, 125, 126, 127, 133, 134

Estabilidade transitória 36

### F

Fuzzy 58, 59, 61, 63, 69, 70, 123, 135, 136, 138, 142, 143, 144, 145, 146, 159, 160, 170, 171, 187, 188, 194, 198, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 216, 222, 223, 225, 239

### G

Gás natural 58, 59, 69, 70

### H

HOG 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22

## I

Identificação de sistemas 36, 38, 39, 47, 48, 116, 124, 128, 134, 209

## L

Ladder 135, 136, 144, 145

Lógica fuzzy 59, 61, 63, 135, 138, 170, 207

LSS 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22

## M

Máquinas de ensaio 49, 51

Modelagem de carga 36, 37, 38, 39, 46

Modelos matemáticos 1, 3, 10, 38, 39, 128, 135

## P

Países desenvolvidos 23, 24, 26, 28, 29

Países emergentes 23, 27, 28, 29, 31

Processamento de imagens 12, 21

Protótipo 73, 79, 82, 83, 84, 86, 93, 148, 149, 150, 167, 168, 189, 196

## R

Reconhecimento 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 110, 112, 113, 123, 174, 176, 179, 203, 204, 210

Refrigeração com dióxido de carbono 96

Robô delta 83, 93, 94

## S

Servomecanismo 124, 125, 126, 127, 128, 131, 132, 133, 134

Sistema de posicionamento 83

Supervisor 52, 54, 55, 82, 85, 88, 135, 145

Svm 12, 14, 17, 19, 21, 22

## T

Tomada de decisão inteligente 58

Turbina eólica 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10

## V

Válvulas automáticas industriais 95, 96

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**