


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

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

CAPÍTULO 1	1
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023031	
CAPÍTULO 2	11
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023032	
CAPÍTULO 3	23
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023033	
CAPÍTULO 4	36
MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO	
Igor Ferreira Visconti	
DOI 10.22533/at.ed.6522023034	
CAPÍTULO 5	49
INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA	
Périson Pavei Uggioni André Roberto de Sousa Anderson Daleffe Diego Tiburcio Fabre	
DOI 10.22533/at.ed.6522023035	

CAPÍTULO 6	58
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY E ALGORITMOS DE APRENDIZADO PARA SEQUÊNCIA DE PARTIDA DE PLANTAS INDUSTRIAIS	
André da Silva Barcelos Fábio Muniz Mazzone	
DOI 10.22533/at.ed.6522023036	
CAPÍTULO 7	72
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023037	
CAPÍTULO 8	82
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023038	
CAPÍTULO 9	95
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	
DOI 10.22533/at.ed.6522023039	
CAPÍTULO 10	110
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	
DOI 10.22533/at.ed.65220230310	
CAPÍTULO 11	124
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

CAPÍTULO 18	209
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	
DOI 10.22533/at.ed.65220230318	
CAPÍTULO 19	224
CONSTRUÇÃO, DESIGN DE CONTROLE E CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR BLUETOOTH DE UM ROBÔ AUTO EQUILIBRANTE	
Giulio Cesare Mastrocinque Santo Claudio Garcia	
DOI 10.22533/at.ed.65220230319	
SOBRE OS ORGANIZADORES	240
ÍNDICE REMISSIVO	241

INFLUÊNCIA DO ERRO DE QUANTIZAÇÃO APLICADO NO CONTROLE DIGITAL DE VELOCIDADE DE UM MÓDULO SERVOMECANISMO DIDÁTICO

Data de aceite: 17/03/2020

Vladimir Ap. Freire Junior

vlademirjunior@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR – Campus Guarapuava

Marcelo Henrique Granza

marcelogranza@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR – Campus Guarapuava

João Luiz Dallamuta

joaol@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR – Campus Guarapuava

RESUMO: Este artigo apresenta o controle de velocidade de um módulo servomecanismo didático variando a quantização dos sinais de entrada e saída de um controlador. Tal trabalho tem o intuito de demonstrar para os alunos dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação, que o desempenho dos controladores industriais depende tanto da sintonia do controlador como também da resolução do controlador utilizado, abordando os conceitos sobre quantização de sinais, métodos de identificação de sistemas e sintonia de controladores demonstrando na prática os efeitos do erro de quantização sobre um controlador PI digital, proporcionando de

forma rápida e eficiente aos alunos a absorção do conhecimento teórico visto em sala de aula.

PALAVRAS-CHAVE: Controlador PI, Erro de Quantização, Identificação de Sistemas, Servomecanismo.

INFLUENCE OF ERROR IN APPLIED QUANTIZATION SPEED CONTROL OF A TEACHING MODULE SERVO-MECHANISM

ABSTRACT: This paper presents the velocity control of a teaching servo-mechanism module varying the quantization of the input and output signals of a controller. This work aims to demonstrate to students of undergraduate courses in Electrical Engineering and Automation and Control Engineering, the performance of industrial controllers depends on both the tuning of the controller as well as the resolution of the driver used by addressing the concepts of quantization signals, system identification methods and tuning controllers demonstrating in practice the effects of quantization error on a digital PI controller, providing a fast and efficient way students absorption of theoretical knowledge seen in class.

KEYWORDS: PI controller, quantization error, Identification Systems, Servo-Mechanism.

1 | INTRODUÇÃO

O erro de quantização é diretamente proporcional ao valor unitário de quantização. Visto que o valor unitário de quantização depende do número de bits de dígitos de um conversor A/D ou um conversor D/A (PING & SHUAI, 2009). O quantizador é um típico elemento não-linear. Sendo assim, o desempenho de um sistema de controle provavelmente será afetado pelo erro de quantização, levando o controle a ter inesperadas perturbações ou oscilações.

A proposta deste trabalho é desenvolver uma aplicação de um controlador PI utilizando métodos de identificação e sintonia apresentados na literatura e após o sistema estar adequado para controle variar os níveis de quantização dos sinais de entrada e saída do controle a partir de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* de 12 bits, propiciando assim, que os alunos possam realizar análises de desempenho para variados níveis de quantização evidenciando na prática os efeitos quantização nos sistemas de controle.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 é apresentado o Módulo Servomecanismo Didático utilizado nos experimentos práticos. Na Seção 3, é evidenciado conceitos sobre quantização, na Seção 4 é feita uma introdução sobre identificação e modelagem de sistemas juntamente com a identificação do módulo didático servomecanismo. Na Seção 5 é descrito a estratégia de controle e a Seção 6 apresenta o controle de velocidade quantizado. Finalmente, na Seção 7, as conclusões do artigo são apresentadas.

2 | MÓDULO SERVOMECANISMO DIDÁTICO

Para execução da seguinte proposta utilizou-se de um módulo didático modelo 2208 desenvolvido pela Datapool Eletrônica Ltda, o qual é constituído por um servopotenciômetro como transdutor de deslocamento angular. Para a aferição da rotação utiliza-se um tacômetro que fornece um sinal de tensão proporcional à velocidade na faixa de 0 a 5V. O módulo possui também um servomotor de corrente contínua de ímã permanente acoplado a um conjunto mecânico que aciona o conjunto braço/ponteiro do sistema de rotação. A tensão de armadura é alterada por um driver de acionamento linear na faixa de -5 a 5V (DATAPOOL, 2006). A Figura 1 apresenta o módulo 2208.



Figura 1 – Módulo Didático Datapool Servomecanismo

3 | QUANTIZAÇÃO DE SINAIS

O processo de quantização pode ser visto como o mapeamento do sinal, a partir do domínio contínuo para um número finito de níveis de saída. Como o sinal analógico pode ter uma amplitude teoricamente infinita, mas na realidade com um valor máximo de amplitude, divide-se este intervalo de valores possíveis em alguns níveis de amplitude de saída. O valor unitário de quantização $q(t)$ pode ser calculado pela seguinte equação.

$$q(t) = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^N}, \quad (1)$$

onde:

N representa o número de bits do conversor;

V_{ref+} representa o extremo superior da tensão do sinal a ser codificado;

V_{ref-} representa o extremo inferior da tensão do sinal a ser codificado;

Uma vez que uma placa de aquisição de 12 bits apresenta 4096 níveis de representação do sinal, por causa da limitação da representação do sinal existirá sempre a presença de erro de quantização, no sinal quantizado. O quantizador uniforme utilizado no trabalho tem um passo de quantização constante, entre os níveis de quantização. A relação sinal-erro (incluindo o erro de quantização) é um fator que afeta o desempenho do controle, pois os sinais perdidos entre os níveis de quantização não podem ser recuperados. A quantização uniforme utiliza níveis iguais de quantização em todo o “range” de entrada do sinal analógico.

3.1 Erro de Quantização

A utilização da quantização introduz um erro $e[n]$, chamado de erro de quantização, definido pela diferença entre o valor atual do sinal de entrada e o valor

quantizado, e dado por

$$e[n] = \hat{x}[n] - x[n] \quad (2)$$

onde $x[n]$ é uma sequência de entrada com um intervalo contínuo de amplitudes, e $\hat{x}[n]$ a sequência quantizada. O erro de quantização é limitado por,

$$-\frac{\Delta}{2} < e[n] < \frac{\Delta}{2} \quad (3)$$

sendo Δ a resolução do quantizador calculado por,

$$q(t) = \Delta = \frac{X_{max}}{2^N} \quad (4)$$

onde X_{max} é o maior valor de representação do sinal de entrada.

3.2 Algoritmo de Quantização

A aplicação proposta necessitou de uma interface de comunicação entre o controlador e o módulo servomecanismo, provido por uma placa de aquisição NI USB-6008 da *National Instruments*. São adquiridas as tensões referentes à velocidade do servomecanismo, as mesmas são processadas no software MatLab®, essa comunicação é feita via USB, onde a placa de aquisição NI USB-6008 apresenta os seguintes dados:

- 8 entradas analógicas de 12 bits, até 10KS/s;
- 2 saídas analógicas de 12 bits;
- 12 TTL/CMOS linhas digitais I/O;
- 1 contadores 32-bits, 5 MHz;
- Digital Triggering;
- Bus-powered;
- Compatível com software MatLab®.

Para variação dos valores de quantização de entrada e saída do sinal de controle, foi desenvolvido uma função matemática de quantização implementada no MatLab®.

$$Q(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } \left| \frac{x}{q} \right| < 1 \\ \left[\frac{x}{q} \right] \cdot q, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Onde, x representa o sinal de entrada a ser quantizado, o valor de q representa o valor de quantização unitária calculado através da Equação (1) e $Q(x)$ é o valor de

saída quantizado.

4 | IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

O processo de identificação de sistema tem o objetivo de obter equações matemáticas a partir de dados medidos que descrevam pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação de causa e efeito presentes na dinâmica de um sistema (AGUIRRE, 2007).

Consiste na construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos que representam seus aspectos essenciais de forma adequada para uma utilização particular, ou seja, para análise do comportamento, otimização ou controle (FERREIRA JUNIOR, *et al.*, 2013). Em um processo de identificação de sistemas, diferentes procedimentos para a geração e excitação de um determinado sinal de entrada, medição do sinal de saída são utilizados, para: identificação pelo teste de resposta ao degrau, pela resposta em frequência, identificação *on-line* e identificação *off-line* (COELHO & COELHO, 2004). Uma vez obtido os parâmetros do modelo o mesmo é validado, caso os parâmetros escolhidos não apresentem resultados satisfatórios técnicas e estruturas mais complexas são adotadas.

No presente trabalho foi utilizado o método de identificação pelo teste de resposta ao degrau, onde o processo se dá na aplicação de um sinal de entrada do tipo degrau e no armazenamento do sinal de saída. Com a curva de resposta de saída do processo é possível então aplicar diversas técnicas como: gráficas, numéricas ou computacionais para modelar o sistema.

4.3 Identificação do Módulo Servomecanismo Didático

Para obter o modelo matemático de primeira ordem que descreve o comportamento do sistema, foi realizada a análise da resposta a uma entrada degrau. Realizou-se um ensaio a malha aberta, aplicando um degrau de 1,5 rad/s.

Para identificação do sistema foi utilizado o método Broída (HAMITI, 1996), o qual traçou a resposta do sistema de primeira ordem sobre a curva de ordem superior obtida experimentalmente. E verificou um intervalo comum entre elas: um ponto A situado a 28% de Δy e um ponto B situado a 40% de ΔY , conforme na Figura 2.

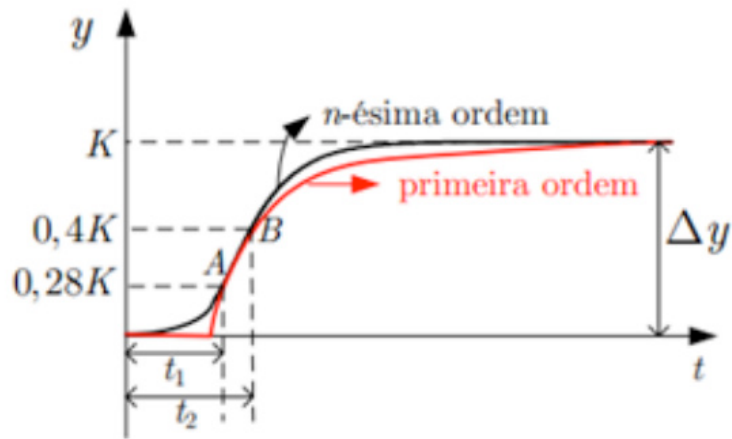


Figura 2: Curva de reação de sistema de primeira ordem sobre a de segunda ordem

Sendo os valores de L e T calculados da seguinte forma:

$$T = 5,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$L = 2,8t_1 - 1,8t_2 \quad (7)$$

Através do ensaio em malha aberta foi possível identificar os valores de $t_1 = 1,7850e - 004$ e $t_2 = 2,2313e - 004$, possibilitando calcular L e T que resultou na seguinte função de transferência.

$$G(s) = \frac{3,307}{0,0002454s + 1} e^{-9,82e-005s} \quad (8)$$

A Figura 3 demonstra uma comparação entre a curva real do sistema considerando um degrau de 1,5 rad/s e a curva gerada a partir do modelo matemático identificado.

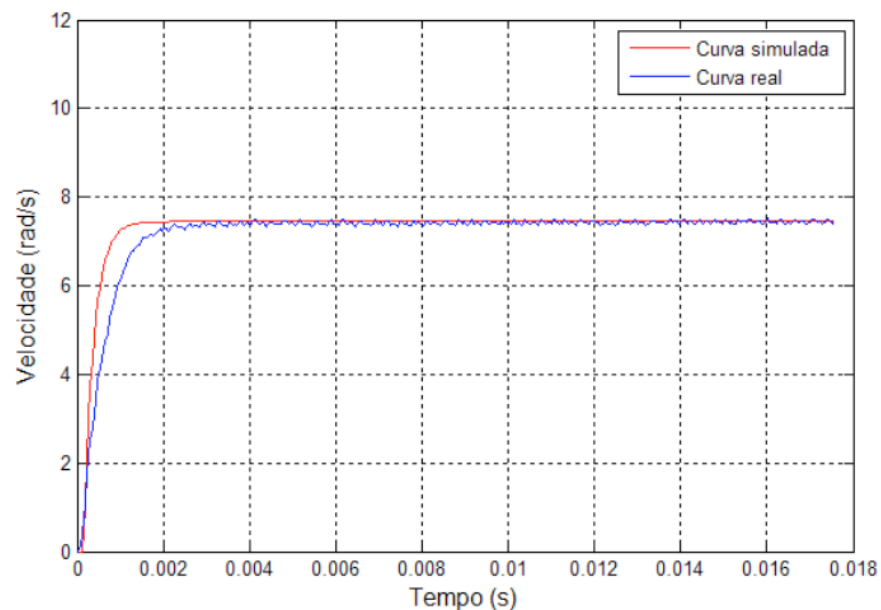


Figura 3: Comparação entre curva real e curva identificada

5 | ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Para realizar o controle de sistemas em tempo discreto, o sinal na entrada do controlador é convertido em uma sequência de números. Sequências são obtidas através amostragem periódica de um sinal analógico, ou seja, o valor numérico do k -ésimo termo de uma sequência é igual ao valor do sinal analógico em um instante KT , onde T é o período de amostragem (OPPENHEIM, 1999), como mostra a Figura 4.

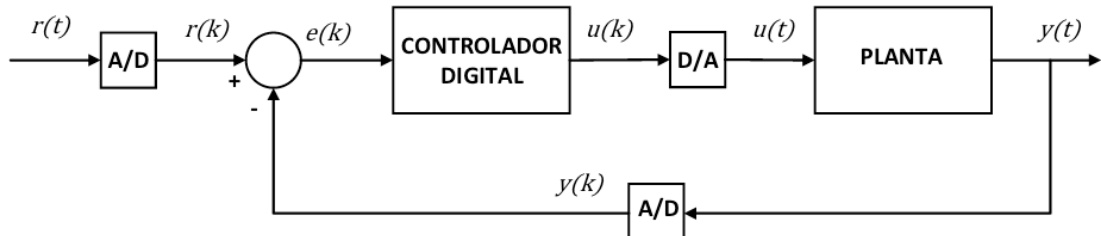


Figura 4: Diagrama de bloco do sistema

Para o controle da velocidade foi adotado o controlador do tipo PI devido levar o erro de regime a zero, pois não é necessário um sinal de entrada para haver saída do controlador deixando o controle mais preciso. O controlador PI tem sua ação de controle $u(t)$ representada pela Equação (9).

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

Para obter uma representação na forma discreta que possibilite sua implementação da Equação (9) em hardware digitais, aplica-se uma transformação *trapezoidal* para o termo integrativo (FRANKLIN *et al.*, 1998). Com isso, obtém-se a seguinte equação de diferenças,

$$u[n] = u[n - 1] + a(e[n] - e[n - 1]) + \frac{b}{2}(e[n] + e[n - 1]), \quad (10)$$

onde:

$$a = K_p \quad (11)$$

$$b = K_p \frac{T_s}{T_i} \quad (12)$$

Para sintonia foi considerado o método de Cohen–Coon, tal método baseia-se no ganho estático do processo, no tempo de atraso e na constante de tempo do processo (COHEN, 1953).

As equações que resumem o método são descritas na Tabela 1.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0,9T}{KL} \left(1 + \frac{0,92\tau}{1-\tau}\right)$	$\frac{3,3 - 3\tau}{1 + 1,2\tau}$	0

Tabela 1: Tabela de Sintonia do Controlador PI, método de Cohen – Coon

Fonte: (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1934).

Onde o parâmetro τ varia entre 0 e 1 e é definido como $\tau = L/(L + T)$. Quanto maior o valor de τ , mais difícil se torna o controle de um processo, pois seu aumento é característico de processos com tempo morto dominante.

Considerando as equações da Tabela 1, é possível obter os parâmetros do controlador PI que resultou em,

$$\begin{aligned} K_p &= 0,3750, \\ T_i &= 1,5239 \end{aligned} \tag{13}$$

6 | CONTROLE QUANTIZADO DE VELOCIDADE

A partir do servomecanismo identificado e sintonizado, juntamente com a placa de aquisição de 12 bits foram geradas curvas de resposta do sistema aplicando um degrau de 3,5 rad/s variando o número de resolução entre 10, 8 e 6 bits utilizando a Equação (5). Sendo o nível máximo de tensão aplicado no servomecanismo de +5V, onde foi possível obter os seguintes níveis de quantização unitária utilizando a Equação (1).

$$q(t) = \frac{5}{2^N} \begin{cases} 0,0012 & N = 12 \\ 0,0049 & N = 10 \\ 0,0195 & N = 8 \\ 0,0781 & N = 6 \end{cases} \tag{14}$$

A Figura 5 apresenta a curva de resposta do sistema controlado em 12 e 10 bits visto que o controle atuando com 10 bits, não atingiu o valor de referência, é possível verificar que mesmo não demonstrou um bom desempenho apresentando um erro médio de velocidade em relação ao controle com resolução de 12 bits de 0,1222 rad/s.

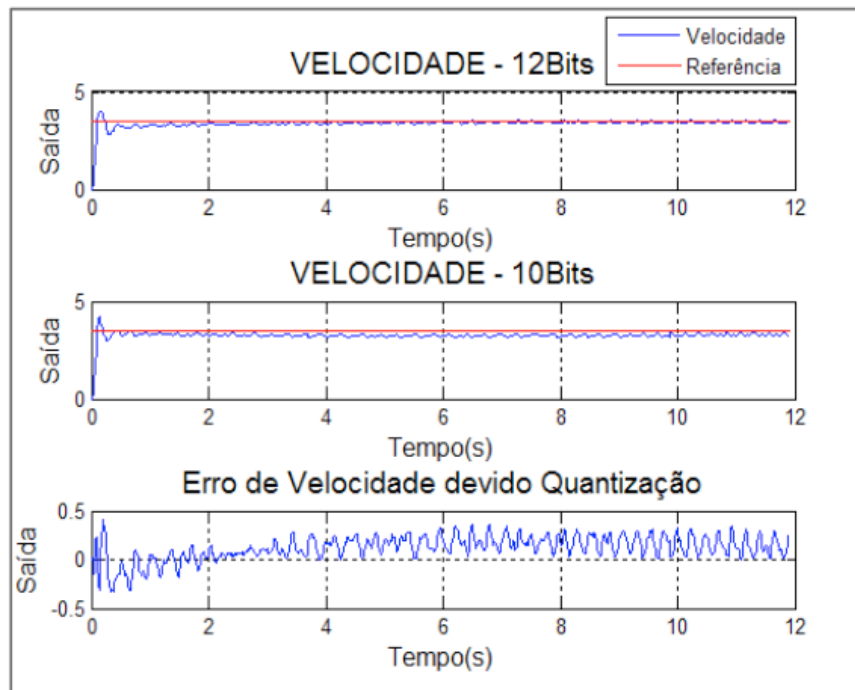


Figura 5: Curva comparativa entre velocidade de 12 e 10 bits

Para o sistema controlado com resolução de 8 bits seu desempenho também não foi satisfatório uma vez que a velocidade do servomecanismo estabilizou-se em 2,7679 rad/s apresentado um erro médio de velocidade de 0,5949 rad/s como pode ser visto na Figura 6.

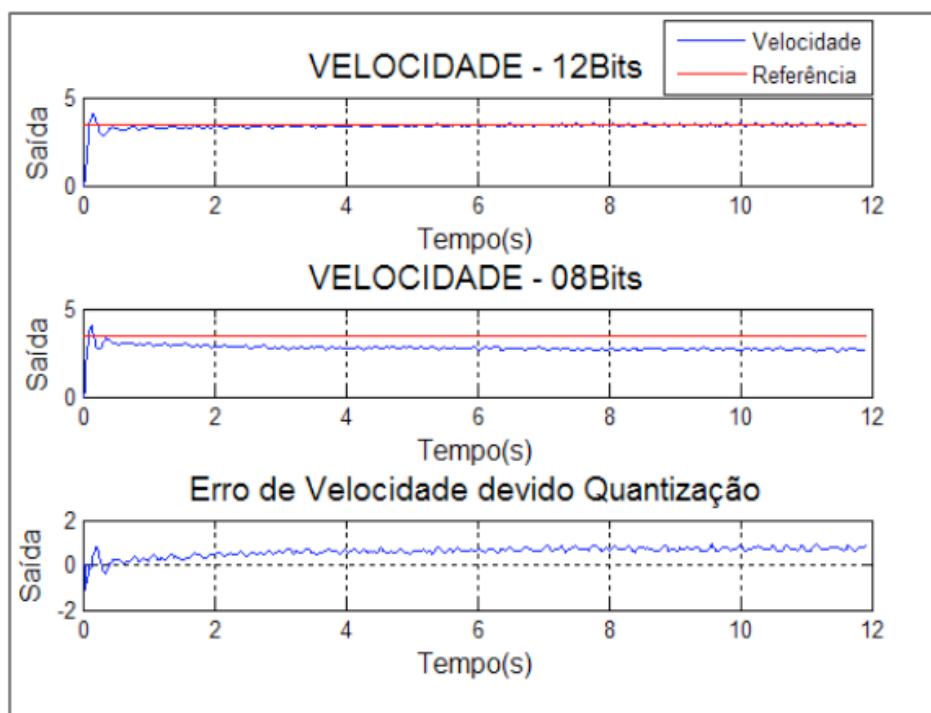


Figura 6: Curva comparativa entre velocidade de 12 e 8 bits

Já no controle operando com resolução de 6 bits, o sistema no primeiro momento alcançou o valor de referência, porém não apresentou boa resposta em

regime tornando-se instável mantendo a velocidade do servomecanismo em um baixo nível mantendo em 1,7735 rad/s apresentando um erro médio de velocidade de 1,5458, apresentado na Figura 7.

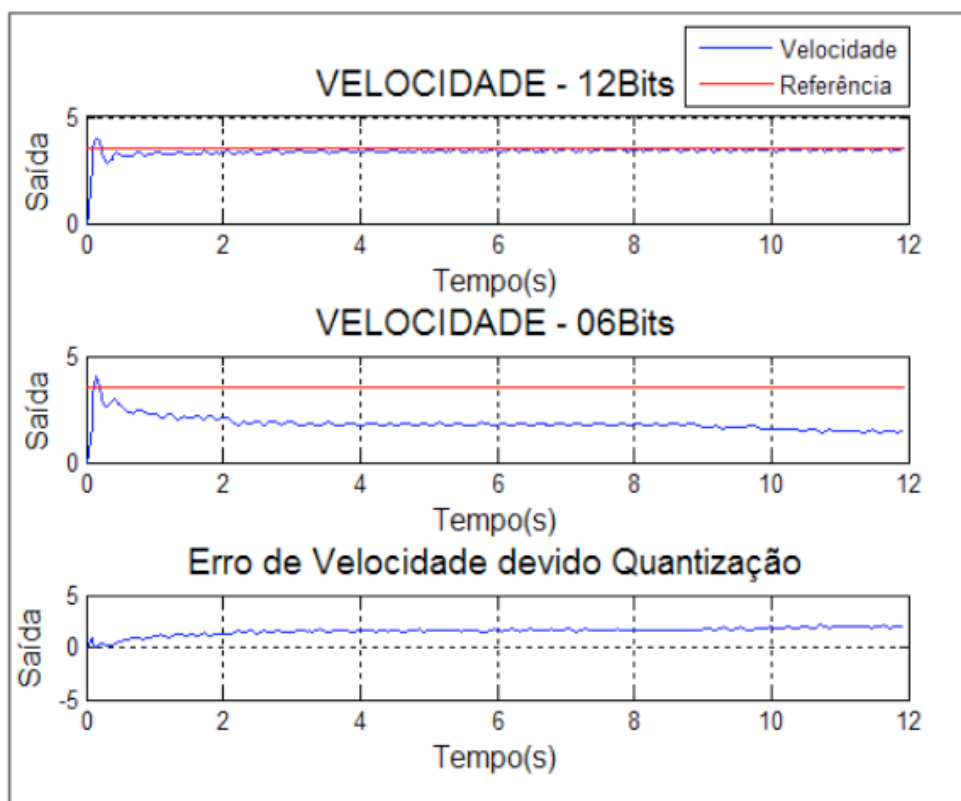


Figura 7: Curva comparativa entre velocidade de 12 e 6 bits

Os valores obtidos na variação da quantização são apresentados na Tabela 2 com intuito de evidenciar com maior clareza tais resultados.

Resolução (Bits)	Erro de quantização (rad/s)	Erro Médio devido quantização (rad/s)
10	0,0049	0,1222
8	0,0195	0,5949
6	0,0781	1,5458

Tabela 2: Resultados Obtidos

Nota-se que em um projeto de automação e controle a resolução do controlador adotado influencia diretamente no desempenho do sistema. Ou seja, quanto menor a resolução da aquisição de sinais pior a resposta do sistema podendo até se tornar instável.

7 | CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo sobre influência da quantização de sinais no controle de velocidade e sintonia de um controlador PI e os efeitos do erro

de quantização no controle de velocidade de um servomecanismo.

O método de identificação de Broída e o método de sintonia de Cohen-Coon apesar da curva de resposta apresentar máximo sobressinal teve um rápido tempo de assentamento demonstrando pouca variação do erro em regime não havendo alteração na resolução da aquisição de dados. Já para avaliação dos efeitos do erro de quantização no controle, pode verificar-se que a influência da resolução da placa de aquisição interfere diretamente na resposta e no desempenho do sistema levando a níveis insatisfatórios de controle, uma vez que os dados perdidos entre os níveis de quantização não podem ser recuperados.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

ÅSTRÖM, K. J.; HÅGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2. ed. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1934.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. d. S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis: Ed. UFSC, 2004.

CARMO, M. J.; GOMES, F. J. Sintonia de controladores e análise funcional de malhas industriais em ambiente multifuncional integrado. Anais: XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Campina Grande: UFCG, 2005.

COHEN, G. H. Theoretical considerations of retarded control. ASME Transactions, v.75, p. 827-834, 1953.

DATAPOOL. Servomecanismo 2208 Datapool manual de experiências, calibração e manutenção. Itajubá, 2006.

FERREIRA JUNIOR, P. A.; FREIRE JUNIOR, V. A.; ANGÉLICO, B. A. Controle digital de malha de nível de uma planta didática industrial. Anais: XLI – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Gramado-RS, 2013.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WOKMAN, M. L. Digital control of dynamic systems. 3.ed. Half Moon Bay: Ellis-Kagle Press, 1998.

HAMITI, K.; VODA-BESANÇON A.; ROUX-BUISSON H. Position control of a pneumatic actuator under the influence of stiction. Control Eng. Practice, v.4, n.8, 1996.

MORARI, M.; ZAFIROU, E. Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ, 1989.

OPPENHEIM, A. V. Discrete-time signal processing. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999.

PING, Y.; SHUAI, P. The Effect of the Quantization Error on the Control Quality of Main Steam Temperature Control of Power Stations. International Conference on Computer and Automation Engineering, p. 159-156, 2009.

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