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 Internazionele 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 Federacl 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

Atena Editora
Ano 2020

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. Claúdia 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

Atena Editora
Ano 2020

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 porem 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 espirito 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
Weslley Kelson Ribeiro Figueredo
Artur Bernardo Silva Reis
Italo Francyles Santos da Silva
Simara Vieira da Rocha
Aristófanes 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 INTELIGETE APLICADO A PAÍSES DESENVOLVIDOS E EMERGENTES: BENEFÍCIOS, BARREIRAS E GRAU DE ADESÃO

Florença Morais 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 Mazzoni

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

Lorenna Maria Figueiredo Albuquerque
Kayon Vinícius 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 Venicios 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**

CAPÍTULO 1

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

Vlademir 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 I 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 estimulo 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 I 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 $(\rho = 1{,}22\ kg/m^3)$ e velocidade (V_v) do vento e pode ser obtida através da seguinte equação.

$$E_c = \frac{1}{2}\rho V_v^2 \tag{1}$$

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.

$$P_t = \frac{1}{2}\rho A V_v^3 \tag{2}$$

$$A = \pi R^2 \tag{3}$$

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..

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

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

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

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_v} \tag{5}$$

Onde ω 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.

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

Onde o valor de λ_i é dado pela Equação 7.

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

De acordo com (GRANZA & VOLTOLINI, 2010), os valores comumente utilizados para os coeficientes são: $c1 = 0{,}5176, c2 = 116, c3 = 0{,}4, c4 = 5, c5 = 21$ e $c6 = 0{,}0068$.

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

$$\omega_r = \frac{\lambda_{max}}{R} V_v \tag{8}$$

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 (Cp) para diferentes valores de (β) e (λ).

Figura 2 - Coeficiente de potência para um aerogerador moderno

Através da Tabela 1 é possível verificar os valores de e obtidos a partir da Figura 2 .

β	λ_{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 β e λ 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).

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

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:

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

3 I 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, *wr(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 $4\,m/s$ de velocidade de vento de entrada em malha aberta, considerando o método de identificação de Broída (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:

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

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

$$K_p = 1{,}6644 \tag{12}$$

$$T_i = 5{,}8018 \tag{13}$$

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 $20\ m/s$ 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 I 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. 3° Edição. LTC. Rio de Janeiro. 2000.

CAPÍTULO 2

RECONHECIMENTO DE DÍGITOS EM IMAGENS DE MEDIDORES DE ENERGIA NO CONTEXTO DE UM APLICATIVO DE AUTOLEITURA

Data de aceite: 17/03/2020

Arthur Costa Serra
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: arthursrr@nca.ufma.br

João Vitor Ferreira França
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: jvitorfranca@nca.ufma.br

Ricardo Costa da Silva Marques
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: ricardo.marques@nca.ufma.br

Weslley Kelson Ribeiro Figueredo
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: weslley.kelson@nca.ufma.br

Artur Bernardo Silva Reis
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: arthurberna@nca.ufma.br

Italo Francyles Santos da Silva
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: francyles@nca.ufma.br

Simara Vieira da Rocha
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: simara.rocha@nca.ufma.br

Aristófanes Correa Silva
Núcleo de Computação Aplicada
Universidade Federal do Maranhão (UFMA) - São Luís, MA, Brasil
E-mail: ari@nca.ufma.br

Eliana Márcia Garros Monteiro
Equatorial Energia - São Luís, MA, Brasil
E-mail: eliana.monteiro@cemar-ma.com.br

Italo Fernandes Serra da Silva
Equatorial Energia - São Luís, MA, Brasil
E-mail: italo.silva@cemar-ma.com.br

Marcia Izabel Alves da Silva
Equatorial Energia - São Luís, MA, Brasil
E-mail: marcia.silva@cemar-ma.com.br

José Messias dos Santos
Equatorial Energia - São Luís, MA, Brasil
E-mail: jose.messias@cemar-ma.com.br

* Este trabalho contou com o apoio do projeto Autoleitura, nanciado pelo grupo Equatorial Energia, no âmbito do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) No PD-00037-0032/2018.

RESUMO: Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), perdas não-técnicas

são aquelas relacionadas a furtos de energia e impedimento de acesso às unidades consumidoras. Uma alternativa viável e de menor custo para a redução dessas falhas seria a leitura realizada pelo próprio consumidor, denominada de autoleitura. Esse processo engloba o uso de plataformas digitais, por meio das quais o consumidor registraria e enviará as informações de consumo. Uma etapa primordial desse processo e o reconhecimento automático de dígitos em medidores por meio de imagens. Este trabalho propõe um método computacional para a realização dessa tarefa. São utilizados os descritores de característica Histogram of Oriented Gradients (HOG) e Local Self-similarity (LSS) de forma combinada e o classificador Máquina de Vetores de Suporte (SVM). O método alcança acurácia de 97,90% e 96,72%, respectivamente, para o reconhecimento de dígitos em medidores digitais e analogicos.
PALAVRAS-CHAVE: Consumo de Energia, Autoleitura, Reconhecimento, Processamento de imagens, Aprendizado de Máquina, HOG, LSS, SVM.

ABSTRACT: According to Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), non-technical losses are those related to energy theft and access impediment to consumer units. A feasible and low cost alternative for reducing these failures would be the reading done by customers which is called self-reading. This process includes the use of digital platforms and the customer would register and send consumption information. A primordial step of this process is the digits automatic recognition in energy meters through images. This work proposes a computational method to perform this task. Histogram of Oriented Gradients (HOG) and Local Self-similarity (LSS) descriptors are combined and used with Support Vector Machine (SVM) classier. The proposed method obtains accuracy of 97.90% and 96.72% respectively for digits recognition in digital and analogical energy meters.
KEYWORDS: Energy Consumption, Self-reading, Recognition, Image Processing, Machine Learning, HOG, LSS, SVM

1 I INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de energia elétrica tem crescido bastante nos últimos anos. De acordo com estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo nacional de energia elétrica atingiu, em 2018, cerca de 472.200 GWh (*gigawatts*). O consumo residencial corresponde a 28% deste valor (ANEEL, 2019). Isso é justificado, por exemplo, pelo aumento no número de domicílios que passará de 75 milhões em 2020 segundo previsões (Vidinich and Nery, 2009).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aponta que podem ocorrer perdas técnicas e não-técnicas no processo de distribuição de energia (ANEEL, 2019). As perdas técnicas relacionam-se à quantidade de energia elétrica dissipada entre os suprimentos de energia da distribuidora e os pontos de entrega (unidades consumidoras ou distribuidoras supridas). As perdas não associadas com as

situações descritas, anteriormente, são chamadas de não-técnicas. Furtos de energia, impedimento de acesso às unidades consumidoras e erros de medição e de processamento de faturamento são exemplos desse tipo de perda.

Em geral, as perdas não-técnicas são descobertas durante o processos de leitura e fiscalização do consumo de energia. A Companhia Energética do Maranhão (CEMAR) e as Centrais Elétricas do Pará S.A (CELPA) utilizam um dispositivo móvel e uma impressora portátil para coletar as informações de consumo e imprimir a fatura dos clientes. Para isso, o leiturista precisa informar manualmente o consumo tal qual é mostrado no registro de energia, o que faz esse processo suscetível a erros, gerando, portanto, inconsistências no faturamento mensal.

Uma alternativa para evitar erros seria a utilização de medidores inteligentes, mas este equipamento tem um custo elevado e a troca de todo o parque de equipamentos de medição (incluindo medidores analógicos e digitais) por esta tecnologia seria uma solução a longo prazo. Outra alternativa viável e de menor custo, seria a leitura realizada pelo próprio consumidor, denominada de autoleitura. Este processo engloba o uso de plataformas digitais, como *sites* ou aplicativo desenvolvido para dispositivo móvel, por onde o consumidor registraria e enviaria as informações de consumo.

Existem várias vantagens no processo de autoleitura. Pode-se destacar um estreitamento na relação de confiança entre companhias e consumidores, bem como a diminuição dos custos das companhias e a redução dos erros de leituras, principalmente em áreas rurais ou de difícil acesso.

A autoleitura também promove ao consumidor um maior controle sobre o seu consumo de energia. Uma vez obtido o valor do consumo, a companhia pode emitir a fatura ou fazer uma simulação da mesma, garantindo agilidade no processo de pagamento da fatura.

Nesse cenário, métodos computacionais capazes de realizar, automaticamente, a leitura do consumo de energia das unidades consumidoras por meio de análise de imagem podem auxiliar na aferição do consumo, facilitando e agilizando esse processo, tornando-o menos passível de erros.

Um método computacional de autoleitura por meio de imagem se dá, primeiramente, com a captura da fotografia do display do medidor. Em seguida, cada dígito é segmentado e, por fim, identificados para fins de geração de fatura. Baseando-se nessa proposta, este trabalho apresenta, portanto, um método para o reconhecimento de dígitos em imagens dos medidores de energia utilizados pelas companhias CEMAR e CELPA, visando contribuir com mais eficiência ao processo de leitura e também com a diminuição de perdas relacionadas ao faturamento.

O método utiliza técnicas de processamento de imagem e inteligência computacional para a extração de características e o reconhecimento dos dígitos

tanto em medidores analógicos quanto em digitais, sendo parte integrante de uma aplicação, em desenvolvimento, para a implantação do processo de autoleitura.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta trabalhos relacionados a este; a Seção 3 mostra o conjunto de imagens utilizado; a Seção 4 explica o método proposto; a Seção 5 discute os resultados obtidos por este estudo; e, a Seção 6 apresenta as conclusões.

2 I TRABALHOS RELACIONADOS

Na literatura, existem alguns trabalhos com propostas para a realização automática da leitura do consumo de unidades consumidoras de energia elétrica baseado em imagens. Parthiban and Palanisamy (2013) utilizam cada pixel da imagem do dígito como entrada para uma rede neural artificial responsável pelo reconhecimento. Zhang et al. (2016) apresenta uma proposta de localização e segmentação dos dígitos utilizando detecção de borda, componentes conectados, e morfologia matemática.

Quintanilha et al. (2017) propõem o reconhecimento baseado em características extraídas com *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) em conjunto com o classificador Máquina de Vetores de Suporte (SVM). Os autores realizam experimentos com medidores analógicos obtendo acurácia de 79,52%.

Em nosso trabalho, propomos uma evolução do trabalho de Quintanilha et al. (2017), pois, abordamos o reconhecimento de dígitos não somente em medidores analógicos, como também em medidores digitais, utilizando a combinação de características extraídas via HOG e *Local Self-Similarity* (LSS).

3 I BASE DE IMAGENS

As companhias CEMAR e CELPA utilizam medidores analógicos e digitais para aferir o consumo de energia dos clientes. Exemplos desses medidores podem ser visualizados na Figura 1. No geral, esses dispositivos encontram-se dentro de uma caixa protetora com uma parte transparente para que o leiturista possa conferir os dígitos no *display* e realizar a leitura de consumo.

As imagens de medidores foram adquiridas sob condições irrestritas de iluminação e orientação, simulando o processo de autoleitura. É importante ressaltar que, eventualmente, a caixa protetora do medidor pode conter avarias pela ação de agentes externos. Isso pode dificultar a visualização dos dígitos. Não obstante, imagens com essas características não foram descartadas.

A base de dados utilizada neste trabalho contém imagens dos dígitos de 0 a 9, separados entre os tipos digital e analógico. Os dígitos foram recortados

manualmente das imagens de *displays*, cuja segmentação também se deu de forma manual a partir das imagens dos medidores. A Figura 2 mostra exemplos de dígitos de medidores digitais. Este conjunto contém 10.613 imagens.

A Figura 3 apresenta exemplos de dígitos observados em medidores analógicos. A CEMAR e a CELPA utilizam 7 modelos diferentes de medidores analógicos, e isso garante bastante variabilidade para a base de imagens. Os dígitos de cada modelo de medidor têm características diferentes entre si. Sendo assim, a base de dígitos analógicos foi organizada, primeiramente, baseada nas fontes dos dígitos e, em seguida, pelas classes de números. Este conjunto possui 18.139 imagens divididos de acordo como apresentado pela Tabela 1.

Figura 1. Exemplos de modelos de medidores digital (A) e analógico (B) utilizados pelas companhias.

Figura 2. Exemplos de dígitos oriundos de medidores digitais.

Figura 3. Exemplos de dígitos oriundos de medidores analógicos das classe C1 a C7.

Medidores	Total
Classe 1	2410
Classe 2	3149
Classe 3	4455
Classe 4	3804
Classe 5	622
Classe 6	2955
Classe 7	744

Tabela 1. Quantidade de dígitos analógicos por tipo de medidor.

4 I MÉTODO PROPOSTO

Este trabalho tem como objetivo o reconhecimento de dígitos em medidores digitais e analógicos. Assim sendo, a proposta apresentada insere-se em um *pipeline* como um passo posterior às etapas de detecção do *display* e de segmentação dos dígitos.

O método proposto para o reconhecimento de dígitos é composto pela sequência de etapas ilustradas pela Figura 4.

Figura 4. Etapas do Método Proposto.

As imagens dos dígitos previamente segmentadas são a entrada para o método. Os dígitos provenientes de medidores digitais passam por um pré-processamento. Aqueles oriundos de medidores analógicos, não. Em seguida, as imagens são passadas para a etapa de extração de característica e estas, por fim, para o classificador SVM, o qual realizará o reconhecimento.

Fatores externos, como iluminação, impactam diretamente o *display* em medidores digitais e têm menor efeito nas imagens de dígitos de medidores analógicos. Portanto, optou-se por aplicar o pré-processamento somente para aquele tipo de imagens. Nas seções seguintes serão explicadas as fases do método proposto.

4.1 Pré-processamento

No momento da captura, fatores externos, como a iluminação, podem interferir diretamente na qualidade da imagem adquirida dos dígitos em medidores digitais, resultando, principalmente, em problemas de contraste.

Dadas essas condições, faz-se necessário aplicar técnicas de pré-processamento a fim de melhorar as imagens, favorecendo uma melhor extração das características. Para o método proposto, foi aplicado o melhoramento por otimização de contraste baseada em fusão variacional (VFGLE).

A otimização de contraste baseada em fusão variacional (VFGLE) foi proposta por Tian and Cohen (2018) para melhorar imagens com iluminação não-uniforme de forma adaptativa. Realiza-se melhoramento global e local, os quais são combinados

via otimização de contraste e correção de cores, resultando em imagens com níveis de cores mais balanceados. A Figura 5 ilustra resultados da aplicação das técnicas supracitadas em imagens de dígitos provenientes de medidores digitais.

Figura 5. Aplicação da técnica VFGLE para o melhoramento de contraste.

4.2 Extração de Características

Para a extração de características, faz-se uso as técnicas *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) e *Local Self-Similarity* (LSS).

Características de objetos como forma e aparência locais podem ser bem representadas pelas suas bordas e também pela distribuição das intensidades dos gradientes. O HOG (Dalal and Triggs, 2005) é uma técnica que consegue capturar características locais a despeito de ruídos provenientes da textura, extraindo gradientes e direções de bordas (Yao et al., 2015). Para tornar a extração de características invariante ao tamanho das imagens, o conjunto de células, blocos, ângulos e demais parâmetros do HOG devem ser constantes para cada região extraída (Quintanilha et al.,2017).

O LSS (Shechtman and Irani, 2007) é um descritor local que pode ser utilizado de forma global. Captura a similaridade entre cores, arestas, padrões repetitivos e texturas complexas de uma forma unificada. A imagem é segmentada em vários *patches* de um dado tamanho. Esses *patches* são comparados com seus blocos vizinhos em uma área abrangente de determinado tamanho centrada em um ponto *q*. Com isso, é calculada a soma do quadrado das diferenças (SQD) entre os *patches*. O SQD é normalizado e transformado em uma área de correlação. O resultado é normalizado e projetado em um espaço de intervalos particionados pelo número de

intervalo de ângulo e intervalo radial. Por fim, o valor máximo no intervalo de espaço é considerado o valor da característica.

O processo de seleção de características também é abordado neste trabalho a fim de obter um conjunto de atributos menor e mais representativo para as instâncias. Nesta etapa, utiliza-se o algoritmo *BestFirst* (Hall et al., 2009). Este seletor utiliza uma estratégia gulosa para buscar a melhor combinação de atributos dentro do espaço de características.

5 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados dois experimentos, um utilizando as imagens de dígitos de medidores analógicos e outro com os de medidores digitais. Em cada experimento, foram feitos testes com e sem seleção de características a fim de verificar qual desses produziria os melhores resultados.

A combinação dos descritores HOG e LSS gerou instâncias com 5825 características para ambos os tipos de dígitos. O descritor HOG foi configurado com os seguintes parâmetros: número de blocos igual a 4, sendo 8 células por bloco com sobreposição igual a 1; e número de direções no histograma igual a 24. Para o LSS, foram utilizados: o tamanho dos *patches* (5px), o raio para os blocos (40), o número de intervalos radiais dos *patches* da imagem (3) e o intervalo de ângulos (12). É importante ressaltar que os parâmetros foram definidos empiricamente para ambos os descritores.

As instâncias são submetidas ao classificador SVM (Cortesand Vapnik, 1995) utilizando-se o método de validação cruzada *k*-fold (*k=10*). Reitera-se que os experimentos foram realizados com cada conjunto de imagens (digital e analógico) separadamente. Logo, foram gerados dois modelos de inferência, um para cada tipo de dígito.

Os experimentos com SVM foram executados com o auxílio da biblioteca Scikit-Learn *scikit-learn* implementada em linguagem Python[1]. Foram realizados testes com e sem seleção de características. Nestes experimentos, a utilização do seletor *BestFirst* deu-se com o auxílio da ferramenta WEKA (Hall et al., 2009).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos de acurácia para o reconhecimento de dígitos de medidores analógicos. Observa-se que os testes com e sem seleção de características alcançaram acurácia média de 96,30% e 96,72%, respectivamente. A etapa de seleção reduziu o conjunto para 200 características.

Medidores	HOG+LSS	HOG+LSS com Seleção
Classe 1	91,50%	92,50%

1 https://www.python.org/.

Classe 2	97,00%	96,90%
Classe 3	98,20%	97,80%
Classe 4	96,80%	96,50%
Classe 5	95,30%	97,50%
Classe 6	98,20%	98,10%
Classe 7	97,20%	97,80%
Média	96,30% ± 2,32	**96,72% ± 1,94**

Tabela 2. Resultados do método proposto para dígitos de medidores analógicos separados por tipo de medidor.

Observa-se que o teste com seleção de características apresentou o melhor valor de acurácia e também um desvio padrão menor, entre as classes de medidor em comparação com o experimento sem a etapa de seleção. Isso indica um reconhecimento mais equilibrado entre os tipos de medidores analógicos não obstante a variabilidade entre as fontes dos dígitos.

Quanto aos experimentos realizados com os dígitos de medidores digitais, foram feitos testes sem melhoramento e com a abordagem VFGLE. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3.

	HOG+LSS	**HOG+LSS com Seleção**
Sem pré-processamento	97,80%	97,10%
VFGLE	**97,90%**	**97,60%**

Tabela 3. Resultados do método proposto para dígitos de medidores digitais..

O reconhecimento de dígitos de medidores digitais apresentou melhor resultado quando foi aplicada a técnica de VFGLE como melhoramento de imagem, obtendo acurácias de 97,60% e 97,90%, respectivamente, para os experimentos com e sem seleção de características. A etapa de seleção reduziu o conjunto para 300 caraterísticas. Em contraste aos experimentos com dígitos de medidores analógicos, observa-se na Tabela 3, que o experimento apresentou melhores resultados com o conjunto original de características.

Ressalta-se, também, que há pouca diferença percentual entre os resultados alcançados pelas abordagens sem pré-processamento e com VFGLE. Baseado nisso, considera-se que optar por não executar a etapa de pré-processamento é algo viável, a fim de diminuir possíveis custos computacionais para a realização da tarefa sem comprometer, abruptamente, o resultado esperado.

Por fim, como citado na Seção 2, este trabalho apresenta-se como uma evolução do trabalho desenvolvido por (Quintanilha et al.,2017). . A Tabela 4 mostra a comparação dos resultados de acurácia obtidos por esses trabalhos.

	Med. Analógicos	Med. Digitais
Quintanilha et al., (2017)	97,80%	97,10%
Método Proposto	**97,90%**	**97,60%**

Tabela 4. Comparação com trabalhos relacionados

6 I CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um método para o reconhecimento de dígitos em medidores digitais e analógicos utilizando processamento de imagens e inteligência computacional. O trabalho propôs a utilização combinadas dos descritores HOG e LSS para a extração de características das imagens dos dígitos. O método também utiliza o classificador SVM para a etapa de reconhecimento.

O método apresenta acurácias de 97,90% e de 96,72%, respectivamente, para o dígitos de medidores digitais e analógicos. Portanto, considerados como resultados bastante promissores para a aplicação ao qual este trabalho será integrado.

Como trabalho futuro, cita-se as tarefas de localização dos *displays* nos medidores e de segmentação de dígitos. Além da incorporação do método proposto neste trabalho em uma aplicação de autoleitura para dispositivos móveis. Por fim, busca-se investigar também uma solução que utilize de técnicas de aprendizado profundo, como Redes Neurais Convolucionais (CNNs).

REFERÊNCIAS

ANEEL (2019). Energia no brasil e no mundo. URL http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf.

Cortes, C. and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273–297.

Dalal, N. and Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 1, 886–893 vol. 1. doi: 10.1109/CVPR.2005.177.

Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., and Witten, I.H. (2009). The weka data mining software: An update. *SIGKDD Explor. Newsl.,* 11(1), 10–18. doi:10.1145/1656274.1656278. URL http: //doi.acm.org/10.1145/1656274.1656278.

Parthiban, K. and Palanisamy, A. (2013). Reading values in electrical meter using image processing techniques. In *Intelligent Interactive Systems and Assistive Technologies (IISAT), 2013 International Conference on*, 1–7. IEEE.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., and Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. J*ournal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.

Quintanilha, D.B.P., Costa, R.W.S., Diniz, J.O.B., de Almeida, J.D.S., Braz, G., Silva, A.C., de Paiva,

A.C., Monteiro, E.M., Froz, B.R., Piheiro, L.P.A., and Melho, W. (2017). Automatic consumption reading on electromechanical meters using hog and svm. In *7th Latin American Conference on Networked and Electronic Media (LACNEM 2017),* 57–61. doi:10.1049/ic.2017.0036.

Shechtman, E. and Irani, M. (2007). Matching local self-similarities across images and videos. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–8. doi:10.1109/CVPR.2007.383198.

Tian, Q.C. and Cohen, L.D. (2018). A variational-based fusion model for non-uniform illumination image enhancement via contrast optimization and color correction. *Signal Processing*, 153, 210 – 220. doi:https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.07. 022. URL http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/ S0165168418302548.

Vidinich, R. and Nery, G. (2009). Pesquisa e desenvolvimento contra o furto de energia. *Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL–P&D*, 15.

Yao, S., Pan, S., Wang, T., Zheng, C., Shen, W., and Chong, Y. (2015). A new pedestrian detection method based on combined hog and lss features. *Neurocomputing*, 151, 1006 – 1014. doi:https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.08. 080. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0925231214013393.

Zhang, Y., Yang, S., Su, X., Shi, E., and Zhang, H. (2016). Automatic reading of domestic electric meter: an intelligent device based on image processing and zigbee/ethernet communication. *Journal of Real-Time Image Processing*, 12(1), 133–143.

CAPÍTULO 3

O CONCEITO DE CASA INTELIGETE APLICADO A PAÍSES DESENVOLVIDOS E EMERGENTES: BENEFÍCIOS, BARREIRAS E GRAU DE ADESÃO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 03/12/2019

Florença Morais da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Timóteo - Minas Gerais
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?metodo=apresentar&id=K8089453P7

Rosana Aparecida Ferreira Nunes
Departamento de Computação e Construção Civil
Timóteo - Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/5150393661538081

RESUMO: O mercado global de casas inteligentes (*smart homes*) tem crescido e seu potencial é cada vez mais promissor, sendo aposta do mercado imobiliário nos próximos anos. O interesse pelo tema aumenta à medida que a inteligência artificial se aprimora e dispositivos como o *Google Home* se tornam mais comuns. Contudo, o grau de implantação delas pode variar de acordo com o nível de receptividade dos países. O presente artigo teve como objetivo expor dados e fazer um comparativo a respeito da presença das casas inteligentes e suas tecnologias em diferentes economias. Da mesma forma, buscou-se averiguar que benefícios despertam o interesse de países emergentes e desenvolvidos por elas, bem como os empecilhos à adoção de dispositivos inteligentes e uma análise com relação ao interesse dos países em tecnologias voltadas a *smart homes*. Após análise das pesquisas realizadas, os resultados mostraram que os altos preços dos produtos são os principais motivos da baixa adesão, a preocupação com a segurança dos dados também se destaca como fator que desencoraja os consumidores em potencial. Verificou-se também, que a falta de informação prejudica a popularização das tecnologias. Afinal, quanto menos informadas as pessoas eram, menor era o impacto potencial que enxergavam e, consequentemente, não se interessavam pelos dispositivos e tecnologias.

PALAVRAS-CHAVE: Casas inteligentes; Adesão; Barreiras; Países Desenvolvidos; Países Emergentes.

THE SMART HOME CONCEPT APPLIED TO TO DEVELOPED AND EMERGING COUNTRIES: BENEFITS, BARRIERS AND ADHESION DEGREE

ABSTRACT: The global smart home market has grown and its potential is increasingly promising, with the real estate market betting in it in the coming years. The Interest in the subject grows as artificiais intelligence improves and devices like Google Home become more common. However, their degree of implementation may

vary according to the level of receptivity of countries. This article aimed to expose data and make a comparison about the presence of smart homes and their technologies in different economies. It also was sought to determine what benefits arouse the interest of emerging and developed countries, as well as the obstacles to the adoption of smart devices and an analysis regarding the interest of countries in technologies aimed at smart homes. After analyzing the research, the results showed that the high prices of the products are the main reason for low adherence. Concerns about data security also stood out as factors that discourage potential consumers. Lack of information has been found to hinder the popularization of technologies. After all, the less informed people were, the less potential impact they saw and, consequently, did not get interested in the devices and technologies.
KEYWORDS: Smart houses; Accession; Barriers; Developed countries; Emerging Countries.

1 I INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias inteligentes até alguns anos atrás parecia acessível à realidade de um número limitado de pessoas com condições financeiras mais favoráveis e relacionava-se a conceitos ficcionais e futuristas. Contudo, nos últimos anos tem-se verificado que a procura por essas tecnologias têm aumentado em diferentes classes sociais. Ademais, os consumidores estão cada vez mais envolvidos pelo potencial desses dispositivos. “As tecnologias para casas inteligentes que mais satisfazem as pessoas estão ligadas a economia de energia ou dinheiro.” (Harper, 2003, apud Schweizer et al., p.1, 2015, tradução nossa).

Neste contexto, as casas inteligentes tem se mostrado uma opção promissora para o mercado imobiliário nos próximos anos. Elas abrigam em seu interior uma vasta gama de tecnologias e dispositivos, como por exemplo: RFID, aprendizagem de máquina, inteligência artificial, *bluetooth*, sensores de vários tipos, atuadores. No entanto, ainda existem alguns empecilhos a sua adoção. Balta-Ozkan et al., (p.6,8, 2013, tradução nossa) apresenta alguns desses, como por exemplo: preço, privacidade e segurança dos dados e interoperabilidade.

“A adoção no mercado de tecnologias domésticas inteligentes depende de possíveis usuários que percebem benefícios claros com níveis aceitáveis de risco.” (Wilson, Hargreaves e Hauxwell-Baldwin, p.1, 2017, tradução nossa). Como será apresentado no presente trabalho, a maioria dos países se mostra receptivo as casas inteligentes e seus dispositivos, entretanto, a taxa de adoção dessas ainda é baixa.

Buscando averiguar as causas para tal, foram analisadas pesquisas de mercado em países desenvolvidos e emergentes, e também artigos para embasar os dados levantados. Foram investigadas e discutidas questões como o nível de conhecimento e o impacto potencial, quais os serviços mais atraentes para cada economia, além

dos principais fatores que desencorajam a compra.

2 I A INTERNET DAS COISAS

A Internet das Coisas (*Internet of Things,* em inglês, ou abreviado IoT) pode ser entendida como a tecnologia disruptiva que permite que objetos, muitas vezes comuns do cotidiano possam atuar de forma independente, ou através de comandos nos mais diversos ambientes onde estão inseridos. Do ponto de vista de Magrani (2018, p.20):

> "[...] um ambiente de objetos físicos interconectados com a internet por meio de sensores pequenos e embutidos, criando um ecossistema de computação onipresente (ubíqua), voltado para a facilitação do cotidiano das pessoas, introduzindo soluções funcionais nos processos do dia a dia."

Ainda, pode ser definida como:

> "[...] uma rede dinâmica e global, auto-configurável, na qual as coisas físicas e virtuais têm identidades, usam interfaces inteligentes e se tornam participantes ativas em processos informacionais e sociais por sua capacidade de reagir a eventos e desencadeiam ações com ou sem intervenção humana direta." (CERP IoT, 2009 apud Singer, 2013, p.59).

A rede de caráter abrangente e inovador está adentrando de forma crescente nos mais diversos setores de nossa sociedade. Para Barros (2011, p.30):

> "observa-se, como em nenhum outro momento, o impacto da inclusão da tecnologia na vida das pessoas, atingindo a todos, de todas as maneiras, mesmo aqueles excluídos, vivendo em condições as mais adversas."

De acordo com a *International Data Corporation* (IDC, 2018):

> "o segmento de IoT deve movimentar US$ 745 bilhões no mundo em 2019, com potencial para ultrapassar a marca de US$ 1 trilhão em 2022, puxado principalmente, por aportes do setor industrial e de varejistas."

Outro estudo, realizado pela ABES (Associação Brasileira das Empresas de *Software*) em parceria com o IDC, aponta que os dispositivos inteligentes serão os responsáveis pela circulação na economia brasileira de U$$ 9 bilhões em 2019, com um crescimento de 20% anualmente até 2022 (*Brazilian Software Market* 2019, *Scenario and Trends*, p.4).

3 I CASAS INTELIGENTES

Uma casa inteligente (em inglês, *smart home*):

> "[...] pode ser definida como uma residência que incorpora uma variedade de sensores, sistemas e dispositivos que podem ser acessados, controlados e monitorados remotamente por meio de uma rede de comunicação." (N. King, 2003, apud Bugeja, 2016, p.172, tradução nossa).

Na literatura é recorrente o uso do termo "casa conectada" ou "casa automatizada" para se referir as casas inteligentes, entretanto é preciso ressaltar que existem diferenças entre esses tipos de residência. Muitos dos dispositivos inteligentes encontrados no mercado atualmente apenas possuem a capacidade de se conectar a internet, necessitando de intervenção humana para atuar. De acordo com Links e Cees (2018, p.2, tradução nossa) "o termo "inteligente" implica inteligência com capacidade de decisão". Charlie Wilson et al. (2016, p.5, tradução nossa) diz que "as tecnologias para casas inteligentes permitem o controle pelas famílias, mas também automatizam o controle para as famílias."

3.1 Nível de conhecimento em relação as casas inteligentes

Pesquisas de mercado realizadas em 2016 pela Gfk (*Growth For Knowledge*) e IDC em países desenvolvidos e emergentes tinham como um dos objetivos, investigar o nível de conhecimento dos entrevistados sobre o conceito de casas inteligentes. Foram entrevistados um total de 10.579 pessoas, sendo que dessas, 6.124 foram entrevistadas pelo GfK (16 a 55+ anos) e 4.455 pelo IDC (18 a 60 anos). As Tabelas 1 e 2 mostram os principais resultados do levantamento realizado.

Países Desenvolvidos	Nível de conhecimento (%)			
	Pouco	Razoável	Muito	Muito pouco/Desconheço
China (CN)	23	33	25	19
Estados Unidos (EUA)	29	23	22	26
Reino Unido (GB)	31	23	11	35
Alemanha (DE)	29	29	9	33
Coreia do Sul (KR)	35	13	11	41
Japão (JP)	14	9	7	70

Tabela 1. Nível de conhecimento de países desenvolvidos (consertar essa tabela)

Fonte: GfK *Future of Smart Home Global*, tradução nossa (2016, p.26)

3.1.1 Análise dos países desenvolvidos

- Na China e Estados Unidos encontram-se a maior quantidade de pessoas

que alegam saber muito com relação ao termo, pode-se presumir que esse resultado se relaciona com a idade dos entrevistados (China: 25-34 anos e EUA: 16-24 anos, dados retirados da pesquisa do Gfk, p.9).

- Os alemães e os japoneses são os que afirmam ter menos profundidade no conhecimento a respeito das smart homes. Ademais, o público japonês foi o que mais alegou desconhecer sobre as residências inteligentes. Com base nesta análise e na faixa etária da maioria dos entrevistados desses países (55+ anos), pode-se supor que o pouco conhecimento sobre o assunto, advém do fato do público idoso não estar bem familiarizado com elas e com sua forma de utilização, quanto os entrevistados mais jovens.
- Na Coreia do Sul e no Reino Unido encontram-se a maior quantidade de entrevistados que afirmam conhecer o conceito de forma superficial.

Países Emergentes	Conhecimento da tecnologia (%)		
	Sim	Não tem certeza	Não sabem
Brasil (BR)	62,7	20,4	16,9
Argentina (AR)	70,6	21,4	8
Colômbia (CO)	77,2	14	8,8
México (MX)	70,2	21,2	8,6
Peru (PE)	67	21	12

Tabela 2. Nível de conhecimento de países emergentes

Fonte: QuiSI-Argentina, Brasil, Colômbia, México e Peru, traduzida pelas autoras (2016, p.24)

3.1.2 Análise dos países emergentes

- Dos países emergentes, a Colômbia apresenta maior grau de conhecimento da tecnologia, seguida por Argentina e México;
- Em comparação com os entrevistados dos outros países, os brasileiros são os que afirmam ter menos conhecimento;
- Apesar do público consultado apresentar, no geral conhecer a respeito do tema, o nível de adoção ainda é baixo, e pode-se argumentar que o preço é o principal agente desmotivador (seção 6.2).

4 I TECNOLOGIAS QUE MAIS ATRAEM A ATENÇÃO DE POSSÍVEIS CONSUMIDORES

Devido a possibilidade de conseguir atender de forma individual as necessidades de diferentes perfis e níveis econômicos, existem benefícios que são mais notáveis para determinadas sociedades do que para outras. “Há muitas grandes expectativas de como essas tecnologias em rede irão transformar nossas casas e a vida cotidiana.” (Charlie Wilson et al., e Miha Rihar et al., 2016, 2014 apud Graham-Hanssen, Darby, 2018, p.1).

Pesquisas realizadas pela Gfk e IDC (2016) em países desenvolvidos e emergentes que buscavam saber quais as categorias lhes eram mais atrativas, os resultados das pesquisas são apresentados nas tabelas 3 e 4 a seguir.

Países Desenvolvidos						
Benefícios por Categoria	CN	EUA	UK	DE	KR	JP
	Nível de Interesse (%)					
Segurança e Controle	66	54	39	49	54	31
Eletrodomésticos	61	42	30	37	38	24
Iluminação e Energia	60	54	37	51	43	24
Entretenimento	63	50	38	39	37	23

Tabela 3. Nível de interesse de países desenvolvidos por categorias

Fonte: GfK *Future of Smart Home Global*, traduzida pelas autoras (2016, p 46 - 48)

Países Emergentes					
Benefícios por Categoria	BR	AR	CO	MX	PE
	Nível de Interesse (%)				
Segurança e Controle	83	74,9	79,6	75	81
Eletrodomésticos	52	39,3	39,4	27	34
Iluminação	63	39,1	34,7	34	31
Entretenimento (Áudio e Vídeo)	46	22,6	34,8	26	26

Tabela 4. Nível de interesse de países emergentes por categorias

Fonte: QuiSI-Argentina, Brasil, Colômbia, México e Peru, traduzida pelas autoras (2016, p.24)

4.1 Análise

4.1.1 Segurança e Controle, Iluminação e Energia

- Segurança e controle, iluminação e energia são apontados como benefícios mais notáveis para todos os países. EUA e Coreia do Sul são os países desenvolvidos que mais se atentam ao quesito segurança e controle;
- Os Estados Unidos e a Alemanha são os que mais demonstram interesse na categoria iluminação e energia;
- Dentre os países emergentes, Brasil e Peru apresentam maior nível de interesse em tecnologias voltadas para segurança no ambiente doméstico. Com base nesses dados pode-se confirmar a afirmação feita no início dessa seção de que os dispositivos para casas inteligentes vem para atender necessidades individuais. No caso de países com altos índices de violência o fator segurança se destaca;
- O Brasil também é o mais interessado entre os países latinos em iluminação e controle;
- O brasileiro é o que mais se mostra atraído por tecnologias que proporcionam segurança e economia.

4.1.2 Eletrodomésticos e Entretenimento

- Fazendo uma comparação entre os níveis de interesse dos países emergentes, os que mais se mostraram interessados em eletrodomésticos inteligentes foram Brasil e Colômbia;
- Dos países desenvolvidos, os Estados Unidos foi o que se mostrou mais interessado em eletrodomésticos e entretenimento.

5 I CASAS INTELIGENTES E O IMPACTO EM POTENCIAL

As *smart homes* oferecem aos seus moradores uma nova forma de interação com sua residência.

> "Em termos de benefícios, as tecnologias para casas inteligentes podem fornecer não apenas gerenciamento aprimorado de energia, mas também segurança e proteção aprimoradas, serviços de lazer e entretenimento aprimorados e independência pessoal estendida por meio da prestação de serviços de saúde e vida assistida." (Chan et al., Nyborg e Røpke, 2009, 2011, apud Wilson et al., 2017, p.2, tradução nossa).

Dados da supracitada pesquisa realizada pelo Gfk, buscava averiguar, entre outras questões, o nível de impacto na vida dos entrevistados em um futuro próximo

e obteve os seguintes resultados:

- 75% China;
- 57% Brasil;
- 55% Coreia do Sul;
- 51% EUA;
- 43% Alemanha;
- 47% Reino Unido;
- 19% Japão.

5.1 Análise

Examinando os dados expostos, verifica-se que:

- China e Brasil percebem de forma considerável o impacto em potencial que as tecnologias voltadas para o lar podem trazer, seguidos pela Coreia do Sul;
- Os Estados Unidos e a Alemanha apresentam um nível um pouco inferior em relação às nações já mencionadas;
- De todos os países, o Japão enxerga nas tecnologias inteligentes um impacto potencial muito inferior ao demais. É possível relacionar tal fato a idade da maioria dos entrevistados (seção 3.1).

Estabelecendo uma comparação entre o impacto potencial e o grau de conhecimento (seção 3.1), é possível inferir que quanto maior o nível de conhecimento, mais impactantes as tecnologias são para as pessoas.

6 I DA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS INTELIGENTES

Essa seção tem por objetivo apresentar dados extraídos dos estudos já aqui mencionados, referentes à adoção de produtos inteligentes por parte dos entrevistados.

6.1 Produtos inteligentes

A seguir apresenta-se a porcentagem por país das pessoas que afirmam possuir algum serviço ou dispositivo inteligente, de um total de 6.124 entrevistados.

- 46% China;
- 35% Estados Unidos;
- 26% Alemanha;

- 25% Reino Unido;
- 22% Coreia do Sul;
- 13% Japão.

Através dos dados expostos, hipóteses podem ser levantadas a respeito do baixo índice de adoção na Alemanha e Reino Unido.

- Para os alemães, a dependência de tecnologia, segurança e privacidade dos dados, pode estar pesando na decisão de obter ou não um produto inteligente (Balta-Ozkan et al., 2014, p.72, tradução nossa);
- A incompatibilidade entre os dispositivos inteligentes e suas residências antigas, e fatores como segurança e privacidade (Balta-Ozkan et al., 2014, p.71-72, tradução nossa) são motivos que podem justificar a baixa adesão dos britânicos.

6.2 Nível de adoção das casas inteligentes em países emergentes

O IDC buscou averiguar também entre os países da América Latina qual o nível de adoção desses em relação às casas inteligentes.

Países Emergentes	Nível de adoção(%)			
	Sim, já tem	Pretendo*	Adoraria, porém é caro	Não tenho interesse
Brasil n:1072	1,5	10,8	66,5	21,2
Argentina n: 770	3,6	15,8	60,3	20,3
Colômbia n: 773	3,6	16	62,2	18,2
México n:1070	5,1	17,6	59,6	17,7
Peru n: 770	6,6	19,9	59,1	14,4

Tabela 5. Nível de adoção de países emergentes

Fonte: QuiSI-Argentina, Brasil, Colômbia, México e Peru, traduzida e adaptada pelas autoras (2016, p.24)

(*) as respostas dessa categoria foram somadas com intuito de reduzir o volume de dados na tabela, a pretensão de compra era de 12 e 24 meses.

6.2.1 Análise

Analisando os dados percebe-se que o Brasil se encontra em um nível muito inferior ao dos demais países dentre os que afirmam já ter uma casa inteligente. Com relação a isso, é possível afirmar que mesmo os brasileiros considerando que

as casas inteligentes e suas tecnologias possam ter um grande impacto em suas vidas (seção 5), o grau de adoção a essa nova forma de morar ainda é baixo.

Conjectura-se que essa baixa adesão provém dos altos preços das *smart homes* e seus dispositivos no país, e da desinformação a respeito dos benefícios que essa proporciona (seção 3.1.2).

O Peru é o país onde se tem o maior número de pessoas que afirma já possuir uma casa inteligente, e o que se mostra mais receptivo.

7 I PRINCIPAIS BARREIRAS À ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA *SMART HOME*

"Apesar dos benefícios potenciais das casas inteligentes, a adoção e a taxa de difusão permanece baixa." (Chan et al., 2008; Balta-Ozkan et al., 2013a; Ehrenhard et al., 2014; Yang et al., 2017; Jacobsson et al., 2016; Kim & Yeo, 2015; Anderson, 2007 apud Davit Marikyan, et al., 2019, p.148, tradução nossa).

Ainda com base nos dados da pesquisa realizada pelo Gfk, verificou-se que os maiores entraves na hora de adquirir um produto inteligente são:

- Preço (33%);
- Preocupação com privacidade pessoal (24%);
- Conhecimento dos produtos (23%);
- Preocupação com comunicação através dos sistemas (19%);
- Preocupação com segurança na casa (19%).

Através de consultas a literatura especializa, nota-se que os desafios mencionados são recorrentes em demais pesquisas e estudos. Os preços são tidos como os principais fatores desencorajadores para os compradores em potencial.

> "Como se trata de um produto novo, existe certa aversão ao risco de pagar um preço muito alto em um produto ainda pouco conhecido pelos consumidores." (Al-Momani, Mahmoud e Ahmad, 2016 apud Gomes e Bergamo, 2018, p.261).

A preocupação com a capacidade de garantir privacidade dos sistemas inteligentes, faz com que possíveis consumidores fiquem hesitantes. As *smart homes*, assim como todo dispositivo que se conecta a internet pode sofrer com ataque de *hackers*. Rehman e Manickam (2016, p.4) apresentam alguns dos ataques mais comuns a que uma casa inteligente está sujeita, por exemplo: *Eavesdropping*, ataque de Negação de Serviço (*Denial of Service*, DoS em inglês) e Ataque *Replay*;

- Interoperabilidade: para que a rede funcione com sucesso, seus dispositivos precisam ser capazes de se comunicar uns com os outros. Porém, de acordo com Balta-Ozkan (2013, p. 366, tradução nossa):

> "[...] com diferentes fabricantes de dispositivos favorecendo diferentes tipos de mídia de rede e protocolos de comunicação, muitas vezes essa não é a realidade."

- A falta de conhecimento acerca dos produtos e consequentemente da forma como operá-los.

> "[...] A barreira da usabilidade, que se refere à confiabilidade e facilidade de uso mostrou ter um papel crucial na aceitação da tecnologia ***smart home***, em que a complexidade da tecnologia leva à recusa em adotá-la." (Balta-Ozkan et al. al., 2013a; Alsulami & Atkins, 2016, apud Marikyan et al.,2019, tradução nossa).

Segundo Gomes e Bergamo (2018) os consumidores são mais abertos a ideia de comprar um dispositivo inteligente a partir do momento em que creem ter o conhecimento necessário.

8 I CONCLUSÕES

Os resultados apontam que os níveis de conhecimento variam de país para país.

Brasil e Japão apresentaram o menor nível de ciência a respeito das *smart homes*. Fatores como idade dos entrevistados foram apontados como sendo uma das causas para a baixa popularidade.

Observa-se também, que como o nível de conhecimento e o grau de impacto estão relacionados, quanto mais conhecimento, mais noção do impacto era percebida pelos entrevistados.

O fato de as tecnologias inteligentes poderem ser adaptadas nos mais diversos aparatos faz com que essa possa ser usada de forma a atender aos usuários no ajuste de suas necessidades. Ademais, contribuem para que diferentes economias busquem nela formas de satisfazerem as suas demandas, seja de conforto, economia ou segurança.

Apesar de terem sido analisados países de diferentes níveis econômicos, pode-se chegar ao consenso de que o preço é visto como maior obstáculo para adoção de casas e dispositivos inteligentes. A questão da preocupação com a segurança das informações pessoais também é um fator que contribui para a baixa adoção desses produtos.

Pôde-se concluir que como toda nova tecnologia, as casas inteligentes ainda tem muitas barreiras a transpor, para se tornarem mais populares.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao PICV, Programa Institucional de Iniciação Científica

Tecnológica do CEFET-MG, pois o presente artigo é desmembramento do projeto aprovado no Edital do Programa Institucional de Iniciação Científica 34/18.

REFERÊNCIAS

ABES SOFTWARE. **Dados do setor: estudo 2019 / dados 2018.** Disponível em: <http://www.abessoftware.com.br/dados-do-setor/estudo-2019-dados-2018>. Acesso em: 18 abr. 2019.

Ali, W., Dustgeer, G., Awais, M. and Ali Shah, M. (2017). **IoT based Smart Home: Security Challenges, Security Requirements and Solutions.** *Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing, University of Huddersfield*.

Balta-Ozkan, N., Boteler, B. and Amerighi, O. (2014). **European smart home market development: Public views on technical and economic aspects across the United Kingdom, Germany and Italy.** *Energy Research & Social Science*, [online] 3, pp.65-77. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629614000851 [Accessed 15 Mar. 2019].

Balta-Ozkan, N., Davidson, R., Bicket, M., & Whitmarsh, L. (2013). **Social barriers to the adoption of smart homes.** Energy Policy, 63, 363–374. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.043.

Barros, T. (2011). ***Tecnologias da informação e comunicação (TICs) na educação: professores - mediadores - mentores.***

Bugeja, J., Jacobsson, A. and Davidsson, P. (2016). **On Privacy and Security Challenges in Smart Connected Homes.** *2016 European Intelligence and Security Informatics Conference*.

Gfk.com. (2016). ***Gfk Future Of Smart Home.*** [online] Available at: https://www.gfk.com/fileadmin/user_upload/dyna_content/GB/documents/Innovation_event/GfK_Future_of_Smart_Home__Global_.pdf [Accessed 15 Mar. 2019].

Gfk.com. (2016). ***Smart home white paper.*** [online] Available at: https://www.gfk.com/landing-pages/smart-home-white-paper/ [Accessed 12 Apr. 2019].

Gram-Hanssen, K. and Darby, S. (2018). **"Home is where the smart is"? Evaluating smart home research and approaches against the concept of home**. *Energy Research & Social Science*, 37, pp.94-101.

Gomes, G. and Bergamo, F. (2018). **Chegou a Era da Internet das Coisas? Um Estudo sobre Adoção de Objetos Inteligentes no Contexto Brasileiro**. *Revista Brasileira de Marketing*, 17(02), pp.251-263.

How Smart Homes Can Deliver Sustainability as a Service. (2018). *Microwaves & RF.*, 57, p.2.

Idclatin.com. (2016). ***IDC Argentina QuISI Qualcomm.*** [online] Available at: http://www.idclatin.com/QuISI2016/Argentina.html [Accessed 15 Mar. 2019].

Idclatin.com. (2016). ***IDC Brasil QuISI Qualcomm.*** [online] Available at: http://www.idclatin.com/QuISI2016/Brasil.html [Accessed 6 Apr. 2019].

Idclatin.com. (2016). ***IDC Colombia QuISI Qualcomm.*** [online] Available at: http://www.idclatin.com/QuISI2016/Colombia.html [Accessed 6 Apr. 2019].

Idclatin.com. (2016). ***IDC Peru QuISI Qualcomm.*** [online] Available at: http://www.idclatin.com/QuISI2016/Peru.html [Accessed 6 Apr. 2019].

Idclatin.com. (2016). ***IDC Mexico QuISI Qualcomm.*** [online] Available at: http://www.idclatin.com/QuISI2016/Mexico.html [Accessed 6 Apr. 2019].

IDC RELEASES. **Idc brasil prevê crescimento de 4,9% no mercado de tic em 2019**. Disponível em: <http://www.idcbrasil.com.br/releases/news.aspx?id=2462>. Acesso em: 12 mar. 2019.

Magrani, G. (2018). ***A Internet das Coisas***. 1st ed. Rio de Janeiro: FGV, p.20.

Marikyan, D., Papagiannidis, S. and Alamanos, E. (2019). A systematic review of the smart home literature: A user perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 138, pp.139-154.

PISHVA, D. (2016). Internet of Things: Security and Privacy Issues and Possible Solution. *ICACT Transactions on Advanced Communications Technology (TACT)*, 5.

Schweizer, D., Zehnder, M., Wache, H., Witschel, H. F., Zanatta, D., & Rodriguez, M. (2016). **Using consumer behavior data to reduce energy consumption in smart homes: Applying machine learning to save energy without lowering comfort of inhabitants.** Proceedings - 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2015, 1123–1129. https://doi.org/10.1109/ICMLA.2015.62.

Serafim, E. (2014). 0427 - **Uma Estrutura de Rede Baseada em Tecnologia IoT para Atendimento Médico a Pacientes Remotos.**

Singer, T. (2019). **Casas, Carros e Cidades Inteligentes: um estudo do enquadramento midiático da internet das coisas**. *Geminis*, 1(2), p.59.

Statista. (2019). ***Smart Home - worldwide | Statista Market Forecast.*** [online] Available at: https://www.statista.com/outlook/279/100/smart-home/worldwide [Accessed 26 Apr. 2019].

Ul Rehman, S., & Manickam, S. (2016). **A Study of Smart Home Environment and its Security Threats. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering,** 23(3), 1–9. https://doi.org/10.1142/S0218539316400052.

Wilson, C., Hargreaves, T. and Hauxwell-Baldwin, R. (2017). **Benefits and risks of smart home technologies**. *Energy Policy*, 103, pp.72-83.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 10/02/2019

Igor Ferreira Visconti
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)
Rio de Janeiro, RJ
http://lattes.cnpq.br/1042158397912499

RESUMO: Estudos de transitórios eletromecânicos analisam a capacidade de um dado sistema elétrico de potência atingir um novo ponto de equilíbrio após um distúrbio. Tradicionalmente, as cargas de um sistema de potência são os elementos de maior imprecisão, em função da sua composição de equipamentos consumidores de energia que são ligados ou desligados do sistema ao longo do dia, da semana e do ano. Para as concessionárias de transmissão, os sistemas de distribuição representam as cargas a serem atendidas. Entretanto, os detalhes da topologia dos sistemas de distribuição, onde alguns deles possuem geração distribuída, frequentemente não estão disponíveis ou não estão atualizados no banco de dados de empresas de transmissão. O objetivo deste trabalho é apresenta uma metodologia para obtenção de modelos de cargas baseados em medições, que estima equivalentes para simulações dinâmicas para a operação e o planejamento de um sistema elétrico de potência.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo Genético, Modelagem de Carga, Estabilidade Transitória, Identificação de Sistemas.

ABSTRACT: Electromechanical transient studies analyze the ability of a given electrical power system to reach a new equilibrium point after a disturbance. Traditionally, power system loads are the most inaccurate elements, due to their composition of energy-consuming equipment that is switched on or off throughout the day, week and year. For transmission utilities, distribution systems represent the loads to be met. However, details of distribution system topology, where some of them have distributed generation, are often unavailable or not up to date in the transmission company database. The objective of this work is to present a measurement-based load modeling methodology for dynamic simulations that support operation and planning of electrical power systems.

KEYWORDS: Genetic Algorithm, Load Modeling, Transient Stability, System Identification.

1 I INTRODUÇÃO

A operação estável de um sistema elétrico de potência depende da sua capacidade

de combinar continuamente a geração com a demanda de modo eficiente, tanto tecnicamente quanto economicamente. As características de carga e a severidade de desvios de tensão e frequência de seus valores nominais impactam a dinâmica do sistema de potência, influenciando a estabilidade angular e de tensão, o amortecimento do sistema e as oscilações entre áreas (KUNDUR, 1994). Modelos de cargas muito otimistas são aqueles que em simulações dinâmicas de faltas num sistema elétrico de potência subestimam o real impacto da contingência no barramento de carga, podendo comprometer a segurança do sistema, já que os resultados de tal simulação apresentaria margens de estabilidade maiores do que as condições operativas reais impõem; por outro lado, modelos de cargas pessimistas superestimam o real impacto de um distúrbio no ponto de operação do barramento de carga, consequentemente levando a restrições conservadoras quanto à capacidade de transferência de energia em linhas de transmissão (IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE, 1993).

Apesar da importância das cargas na análise da estabilidade do sistema, ainda são utilizados modelos estáticos genéricos para a representação matemática das cargas em simulações dinâmicas, de acordo com o levantamento apresentado em (CIGRE WORKING GROUP C4.605, 2014). As atividades de planejamento e programação da operação, conduzidas pelo Operador Nacional do Sistema brasileiro (ONS), utilizam ferramentas computacionais para estudos elétricos da operação e do planejamento do sistema interligado nacional. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) provê grande parte das ferramentas computacionais utilizadas pelo ONS em análise de rede, sendo o ANATEM recomendado para a operação e planejamento de sistemas elétricos de potência (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS, 2002). O ANATEM, que realiza simulação de transitórios eletromecânicos para estudos de estabilidade, parte de um ponto de operação dado por outro programa do CEPEL utilizado pelo ONS, o ANAREDE (análise de redes em regimente); no entanto, os modelos de carga utilizados no ANATEM são os mesmos do ANAREDE (modelos estáticos ZIP). Este artigo apresenta uma metodologia para modelagem de cargas, a partir de dados de medição (*measurement-based load modeling*), cujos resultados foram validados numa implementação no ANATEM.

O artigo se organiza da seguinte maneira: a seção 2 descreve os passos principais da metodologia, desde a escolha do modelo dinâmico de carga, passando pela estimação de parâmetros do modelo utilizando um algoritmo genético, incluindo a definição do espaço de busca de soluções do problema. Na seção 3 é apresentada uma aplicação de modelagem de carga a partir de medições, utilizando os dados medidos de um sistema de distribuição real, com geração local. A validação do modelo estimado, a partir de dados reais, foi feita através de uma simulação no ANATEM, comparando qualitativamente a resposta da carga representada pelo

modelo estimado, durante e após a eliminação de uma falta no sistema, com os resultados de outra simulação que utiliza o modelo estático ZIP, para representar o mesmo ponto do sistema. A seção 4 apresenta as conclusões do trabalho.

2 I MODELOS DE CARGAS BASEADOS EM MEDIÇÕES

Modelos de cargas baseados em medições são estimados a partir de variações de tensão (tipicamente afundamentos) causadas por distúrbios originados a montante do medidor. A Fig. 1 ilustra a localização do medidor, cujos dados de interesse são aqueles que registram a resposta de carga para contingências originadas na transmissão. Diferentes dispositivos de aquisição de dados, como medidores de qualidade de energia, registradores de perturbações digitais e PMUs podem ser usados para estimar modelos de cargas baseados em medição.

Fig. 1 – Ilustração do local de instalação do medidor de perturbações no PAC entre transmissão e distribuição.

As respostas das cargas são registradas e usadas para derivar uma representação matemática equivalente, relacionando desvios de potência causados por desvios de tensão. A ideia central da metodologia proposta para modelagem de cargas é inspirada na identificação de sistemas, um conjunto de técnicas voltadas para estimar modelos matemáticos paramétricos, usando pares de dados de entrada e saída medidos de um sistema no qual se deseja representar. Os modelos podem ser formulados como equações diferenciais, equações a diferenças, funções de transferência e espaço de estados (LJUNG, 1999). Neste trabalho, é apresentado um modelo formulado como uma equação a diferença, e as funções de transferência discreta e contínua correspondentes, cuja teoria determina as restrições do espaço de busca para qualquer uma das formulações. Os principais conceitos de identificação de sistemas aplicados à metodologia de modelagem de carga baseada em medições são listados abaixo:

- **Selecionar dados de entrada e saída do modelo**. – o modelo de carga deseja mapear desvios de potência causados por desvios de tensão no barramento de carga; valores instantâneos de tensão e corrente, ou valores efi-

cazes e fundamentais da potência e tensão são utilizados para modelagem de carga voltada para estudos em regime ou dinâmicos.

- **Escolher uma estrutura matemática (modelo) parametrizável** – há uma extensa literatura de modelos matemáticos parametrizáveis utilizados para representar cargas agregadas em análise de sistemas (CIGRE WORKING GROUP C4.605, 2014). A escolha pode ser pautada por tipo de estudo, disponibilidade na biblioteca de modelos do *software* de simulação, pelo significado físico do modelo, por comparação entre um ou mais modelos, por facilidade de implementação ou por questões de convergência da simulação.
- **Estimar os parâmetros do modelo a partir de dados reais** – Diferentes heurísticas de otimização se aplicam a essa tarefa, formulando-se a função objetivo como o erro entre a resposta da carga medida e a resposta do modelo simulada. O conjunto de parâmetros que minimizar este erro é escolhido como representação equivalente da carga.
- **Validação do modelo** – Esta etapa pode ser feita submetendo o modelo estimado a um outro conjunto de dados medidos (dados de validação). No presente artigo, a validação foi feita qualitativamente através da simulação no ANATEM, cujos resultados serão mostrados na seção 3.

A seguir, serão apresentadas as etapas da identificação de sistemas aplicadas à modelagem de carga baseada em medições.

2.1 Seleção e processamento de dados

O medidor utilizado registrou dados instantâneos de tensão e corrente antes, durante e depois de afundamentos de tensão abaixo de 0,9 p.u. A taxa de amostragem de 1920 Hz corresponde a 32 pontos por ciclo de 60 Hz. A Transformada Discreta de Fourier (TDF) (OPPENHEIM, 1999) foi aplicada nos sinais das três fases de tensões e correntes, através de uma janela deslizante, a fim de se calcular as componentes fundamentais fasoriais das três fases de tensões e correntes, antes, durante e depois da eliminação do afundamento de tensão (por isso a “janela deslizante”, com o “tamanho” do período de amostragem, 1/1920 seg.). A partir dos fasores de tensões e correntes, foram obtidas as componentes de sequência de Fortescue (KUNDUR, 1994), uma vez que as análises de transitórios eletromecânicos utilizam somente as componentes de sequência positiva. Finalmente, a partir das componentes de sequência positiva foram obtidas as componentes real e imaginária da potência aparente, isto é, as potências ativa e reativa. O processamento dos sinais de tensão e corrente instantâneos até as componentes de sequência positiva de potência versus tensão foi resumido na Fig. 2.

Fig. 2 – Processamento de sinais de tensão e corrente instantâneos medidos, para obter amostras de componentes de sequência positiva, tal que P1=*f*(V1) e Q1=*g*(V1).

Portanto, as relações que se deseja modelar são P1 (componente de sequência positiva da potência ativa) em função de V1 (componente de sequência positiva da tensão), e as curvas Q1 (componente de sequência positiva da potência reativa) em função de V1.

2.2 Escolha do Modelo de Carga

Modelos de carga podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, onde os primeiros expressam as potências ativa e reativa num instante do tempo, como uma função de desvios de tensão medida no barramento de carga (opcionalmente, levando também em conta os desvios da frequência elétrica do sistema) ocorridos no mesmo instante. Modelos dinâmicos expressam as potências ativa e reativa num instante do tempo, em função de desvios de tensão do barramento de carga medidos naquele instante e nos instantes anteriores.

O modelo dinâmico proposto por (VISCONTI; et al, 2014), formulado em (1), adaptou o modelo autorregressivo (*AutoRegressive with an eXtra input*, ARX) descrito por (LJUNG, 1999) e também por (BOX; JENKINS, 1976). Este modelo é uma combinação linear de valores passados de potência e de tensão, além do valor atual da tensão.

$$\boldsymbol{P(t) = P_0 \left[\sum_{m=1}^{m=M_p} \omega_{mp} \frac{P(t-m\Delta t)}{P_0} + \sum_{k=0}^{k=K_p} \omega_{kvp} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right]}$$

$$\boldsymbol{Q(t) = Q_0 \left[\sum_{m=1}^{m=M_q} \omega_{mq} \frac{Q(t-m\Delta t)}{Q_0} + \sum_{k=0}^{k=K_q} \omega_{kvq} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right]} \quad (1)$$

Onde:

- M_p, K_p, M_q, K_q – Definem a ordem do modelo, e neste trabalho, a escolha foi $M_p = K_p = M_q = K_q = 2$, caracterizando o modelo linear escolhido como de 2ª ordem. Logo, ***m*** e ***k*** variam de 1 a 2 e de 0 a 2, respectivamente.

- V_0, P_0, Q_0, são respectivamente as amostras de tensão, potências ativa e reativa em regime permanente, isto é, correspondem ao ponto de operação antes da ocorrência de um distúrbio capaz de causar um desvio de tensão no barramento de carga sob análise.

- ω_{1p}, ω_{2p}, ω_{0vp}, ω_{1vp}, ω_{2vp}, ω_{1q}, ω_{2q}, ω_{0vq}, ω_{1vq}, ω_{2vq} são os parâmetros a serem estimados, tanto para o modelo da potência ativa, quanto para o modelo da potência reativa.

- Δt – é o inverso da taxa de amostragem (*sampling rate*) do medidor, isto é o período de intervalo entre as amostras da medição. Assim, para uma taxa de amostragem de 1920Hz (configuração do medidor cujos dados são analisados neste artigo), a diferença entre a amostra atual *V(t)* e a imediatamente anterior *V(t-1)* é de 1/1920 segundos, isto é cerca de 0.52ms.

- $P(t)$, $P(t-\Delta t)$, $P(t-2\Delta t)$, $V(t)$, $V(t-\Delta t)$, $V(t-2\Delta t)$ – correspondem às amostras de potência e tensão do "instante atual" ***t*** e às amostras registradas (tipicamente no *buffer* do medidor) um período (Δt) e dois períodos $(2\Delta t)$ anteriores .

As equações seguintes serão apresentadas apenas para a potência ativa, sendo a formulação para a potência reativa idêntica, mudando apenas as variáveis análogas.Como condição de contorno do problema, por definição, $P(t=0)=P_0$, $Q(t=0)=Q_0$ e $V(t=0)=V_0$. Logo, a primeira restrição linear dos parâmetros do modelo (1) é dada por (2):

$$\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp} + \omega_{2vp} = 1 \qquad (2)$$

Aplicando a transformada Z (OPPENHEIM, 1999) em (1) obtém-se a formulação do modelo de carga em termos de funções de transferência (BOX; JENKINS, 1976). A Tabela 1 mostra as funções de transferência tanto no domínio de tempo discreto, quanto no domínio de tempo contínuo. A correspondência entre as formulações pode ser obtida através da transformada de Tustin (CHUANG et al., 1997).

Funções de transferência	
H(z) – tempo discreto	***H(s) – tempo contínuo***
$\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0}\left[\frac{\omega_{0vp}z^2 + \omega_{1vp}z + \omega_{2vp}}{z^2 - \omega_{1p}z - \omega_{2p}}\right]$ **ou** $\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0}\left[\frac{(z + r_{z1p})(z + r_{z2p})}{(z + p_{z1p})(z + p_{z2p})}\right]$	$\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0}\left[\frac{\alpha_{0vp}s^2 + \omega\alpha_{1vp}s + \alpha_{2vp}}{s^2 + \alpha_{1p}s + \alpha_{2p}}\right]$ **ou** $\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0}\left[\frac{(s + r_{s1p})(z + r_{s2p})}{(s + p_{s1p})(s + p_{s2p})}\right]$

Tabela 1 – Representações do modelo proposto através de funções de transferência equivalentes

Onde:

- α_{1p}, α_{2p}, α_{0vp}, α_{1vp}, α_{2vp} são os parâmetros a serem estimados para a função de transferência no domínio do tempo contínuo da potência ativa.
- ***V(s), P(s), Q(s)*** são os sinais de tensão, potências ativa e reativa filtrados pela transformada de Laplace (OPPENHEIM, 1999).
- ***V(z), P(z), Q(z)*** são os sinais de tensão, potências ativa e reativa, após a transformada Z.
- r_{z1p} e r_{z2p} são os zeros, ao passo que p_{z1p} e p_{z2p} são os polos de *H(z)*.
- r_{s1p} e r_{s2p} são os zeros, ao passo que p_{s1p} e p_{s2p} são os polos de *H(s)*.

O modelo ARXproposto em (1) e as funções de transferência da Tabela 1são equivalentes, levando em consideração que a conversão entre os domínios contínuo e discreto estáassociada ao período de amostragem dos sinais de entrada e saída do sistema, isto é, no domínio discreto, assume-se que as amostrassão constantesduranteoperíodo de amostragem. Numa simulação de transitórios eletromecânicos que utilize estes modelos, o passo de integraçãoda simulaçãodeve ser menor do que esse período de amostragem.

2.3 Estimação de parâmetros com Algoritmo Genético

Algoritmo Genético (AG) pode ser definido como uma estratégia de busca de soluções inspirada na teoria da evolução de Charles Darwin (MICHALEWICZ, 1995). A solução para o problema de otimização deve ser codificada e o exemplo mais didático da codificação da solução de um problema de otimização utilizando AG consiste em representar um número inteiro na base binária; o que implica que solução numérica a ser buscada pelo AG seria um vetor de “zeros” e “uns”. Este vetor seria o *cromossoma* do AG (ou *indivíduo* de uma *população* de soluções). A

Tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo ARX (1) e os parâmetros para cada uma das formulações através de funções de transferência, tanto contínua quando discreta (Tabela 1). Os parâmetros são números reais, exceto na codificação dos parâmetros em termos de zeros e polos, que podem assumir a forma de números complexos.

ARX	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$
$H(z) = \frac{P(z)}{V(z)}$	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$ ou $\theta_p = [r_{z1p}, r_{z2p}, p_{z1p}, p_{z2p}]$
$H(s) = \frac{P(s)}{V(s)}$	$\theta_p = [\alpha_{0vp}, \alpha_{1vp}, \alpha_{2vp}, \alpha_{1p}]$ ou $\theta_p = [r_{s1p}, r_{s2p}, p_{s1p}, p_{s2p}]$

Tabela 2. Diferentes codificações dos parâmetros do modelo proposto

Onde:

$\boldsymbol{\theta_p}$ – conjunto de parâmetros a ser estimado pelo AG, de acordo com a escolha do modelo.

Os parâmetros ω_{2vp} e α_{2p} não foram incluídos porque $\omega_{2vp} = 1 - \omega_{1p} - \omega_{2p} - \omega_{0vp} - \omega_{1vp}$ e, aplicando a transformada de Tustin em *H(z)* com as condições de contorno (2) resulta sempre em $\alpha_{2p} = \alpha_{2vp}$. O processo de otimização a partir de AG pode ser resumido nos seguintes passos:

a) Cria-se uma população de soluções para o problema, sujeitas a restrições lineares e/ou não lineares – o programador deve estabelecer uma rotina computacional para gerar uma *população* (conjunto de *indivíduos* ou *cromossomas*), onde cada elemento (ou *gene*) do *cromossoma* deve respeitar eventuais limites inferiores e superiores que cada *gene* pode assumir. Para o modelo ARX escolhido e seus equivalentes, a Tabela 3 apresenta as restrições que os parâmetros devem respeitar (BOX; JENKINS, 1976), definindo assim o espaço de busca de soluções do problema.

ARX	$\omega_{2vp} = 1 - (\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp})$ e $-1 < \omega_{2p} < 1$ e $\omega_{2p} - \omega_{1p} < 1$ e $\omega_{2p} + \omega_{1p} < 1$
H(z)	$\lvert p_{z1p}\rvert<1$ e $\lvert p_{z2p}\rvert<1$
H(s)	$Re\{p_{s1p}\}<0$ e $Re\{p_{s2p}\}<0$

Tabela 3. Equações e inequações lineares de restrição ao espaço de busca de soluções

A Tabela 3 lista as restrições de estabilidade para funções de transferência discretas, requisitando que o módulo dos polos pz1p e pz2p sejam menores que um, enquanto para funções de transferência contínuas, a parte real dos polos deve ser menor que zero (BOX; JENKINS, 1976).

b) Definem-se operadores de seleção, combinação (*crossover*) e mutação – Entre as iterações do AG, as populações evoluem com os operadores de seleção, *crossover* e mutação. A seleção de indivíduos copiados para a próxima geração, ou os que serão escolhidos para se combinarem como pais e mães, ou mesmo escolhidos para a mutação depende de como o programador configura estes operadores. A população seguinte será dividida entre indivíduos copiados da geração anterior (a seleção natural dos mais aptos), indivíduos criados a partir da combinação de pares de indivíduos da geração anterior (*crossover*) e indivíduos copiados da geração anterior, com um de seus elementos (genes) com uma variação aleatória (mutação).

c) Determina-se uma função objetivo ou de avaliação – é o mecanismo de avaliação da solução do problema de otimização codificada em cada indivíduo da população de soluções. Tipicamente, a função objetivo é uma medida de erro (erro médio quadrático, norma euclidiana) entre a medição e a simulação, isto é, a partir de uma curva de potência medida, compara-se cada amostra da curva medida com o resultado da curva simulada pelo modelo parametrizado por um indivíduo da população, o que significa que a cada geração (iteração AG), todos os indivíduos são avaliados e os "mais aptos" tem "maior chance de sobrevivência". A eq. (4) apresenta a função objetivo utilizada para cálculo do erro entre a potência ativa medida e simulada.

$$F_{obj}(\theta_p) = \frac{1}{N}\sum_{ev=1}^{N}\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{P_{med}(ev,t) - P_{calc}(ev,t,\theta_p)}{P_{med}(ev,t,\theta_p)}\right)^2 \qquad (4)$$

Onde:

$\boldsymbol{P_{med}}$, $\boldsymbol{P_{calc}}$ – são, respectivamente, os dados de potência medida e calculadas pelo modelo.

ev – é o índice do evento, por definição consiste em um conjunto de amostras de potência e tensão antes, durante e depois de um desvio de tensão maior $V(t)/V_0 < 0{,}9$ p.u.

n – é o número de amostras de um evento *ev.*

N – é o número total de eventos ***ev***, selecionados como dados de treinamento.

A seguir, a Fig. 3 e a Fig. 4 ilustram a estimação de parâmetros do modelo (1) para representar 4 eventos (*N=4*) com o mesmo conjunto de parâmetros. A Fig. 3 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* da 1ª *geração* do AG, enquanto a Fig. 4 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* para a 20ª geração

Fig. 3 – Melhor solução da 1ª iteração do AG para modelar 4 eventos.

Fig. 4 – Melhor solução após 20 iterações do AG para modelar os mesmos 4 eventos.

3 I RESULTADOS

3.1 Modelagem de um sistema de distribuição com geração

Esta seção utilizará o registro de um distúrbio originado na transmissão e medido no lado de baixa de um transformador T/D (Fig. 1), que separa uma empresa de transmissão do SIN de uma empresa de distribuição, que possui dois geradores térmicos de 111MW e 30 MW. De acordo com o relatório de ocorrências

da transmissora, o distúrbio foi causado por uma descarga atmosférica, que desligou uma linha do sistema de transmissão bem próxima ao transformador que tinha o medidor instalado. A Fig. 5 apresenta a potência medida (curva vermelha), a potência simulada pelo modelo com parâmetros estimados (curva azul) e a potência simulada pelo modelo de carga impedância constante (curva verde), adotado pelo ONS para este sistema de distribuição conectado ao SIN. A Fig. 6 apresenta a potência reativa do mesmo evento. Tanto a resposta do modelo estimado, quanto a do modelo de impedância constante foram calculados a partir dos dados de tensão medida. A estimação dos parâmetros foi feita de forma a minimizar o erro entre a potência medida potência simulada pelo modelo proposto. Observa-se uma oscilação eletromecânica amortecida após a eliminação da falta pela proteção, interpretada como a aceleração e desaceleração das máquinas do sistema de distribuição em relação à frequência síncrona do sistema, diferente de sistemas de distribuição sem geração própria.

Fig. 5 - Estimação de Parâmetros para a potência ativa (P).

Fig. 6 - Estimação de Parâmetros para a potência reativa (Q)

A solução final estimada pelo AG para a potência ativa resultou em uma função de transferência $H_p(s)$ com polos complexos, que foi capaz de reproduzir a oscilação amortecida após a eliminação do defeito. Estes resultados mostram o quão distante podem ser os resultados de uma simulação com a modelagem de carga muito genérica. O resultado gráfico do modelo de impedância constante (curva verde) ilustra o conceito de modelagem de carga muito otimista, subestimando a resposta da carga ao afundamento de tensão registrado. Já a solução final estimada pelo AG para a potência reativa ilustrou uma impossibilidade matemática do modelo de impedância constante: durante o afundamento, a potência reativa assume valores negativos (uma inversão de fluxo), o que seria impossível representar em um modelo que formula a resposta da potência reativa proporcional ao quadrado dos desvios de tensão.

A fim de verificar a eficácia desta modelagem foram estimados modelos para mais de 30 sistemas de distribuição próximos ao local do distúrbio descrito acima.

Todos estes modelos de carga, tanto para potência ativa, quanto para a potência reativa, foram implementados no ANATEM (ELETROBRAS CEPEL, 2010), aplicativo computacional desenvolvido pelo CEPEL e utilizado no setor elétrico brasileiro para análise de transitórios eletromecânicos. Os dados de entrada do programa com todos os elementos da rede básica do SIN estão disponibilizados no formato do ANATEM pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No entanto, os sistemas de distribuição conectados ao SIN não têm as suas topologias detalhadas, são representados com modelos ZIP (IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE, 1993). Assim sendo, foi feita uma simulação de curto-circuito e abertura de linha, próximos ao mesmo transformador citado anteriormente.

Fig. 7 - Potência Ativa simulada na barra de 69 kV com Z constante (P_{zip}) e com o modelo estimado (P_{arx})

Fig. 8 - Potência Reativa simulada na barra de 69 kV com Z constante (Q_{zip}) e com o modelo estimado (Q_{arx})

A reposta do modelo de impedância constante é comparada com as funções de transferência estimadas e apresentadas na Fig. 5 e na Fig. 6. Os resultados do ANATEM aparecem na Fig. 7 e na Fig. 8. Percebe-se qualitativamente que a resposta ao afundamento de tensão dos modelos de carga baseados em medição é muito mais próxima do que foi medido do que a resposta do modelo de impedância constante.

4 I CONCLUSÕES

Este trabalho descreve uma metodologia de modelagem de cargas a partir de dados medidos, para a obtenção de resultados mais precisos nas simulações de transitórios eletromecânicos. No entanto, ao referenciar as etapas principais da identificação de sistemas como fundamento da metodologia, há o intuito de apresentar um procedimento genérico para modelagem em outras aplicações que disponham de dados medidos da entrada e saída de um sistema de interesse.

O algoritmo genético foi utilizado pela sua simplicidade de implementação e também por ser menos sensível a inicialização do problema, isto é, não há necessidade de se determinar quais devem ser os valores iniciais da *população* de

indivíduos, desde que as restrições sejam respeitadas.

Para redes de distribuição ativas com geração térmica, foi preciso restringir o espaço de buscas dos polos da função de transferência *H(s)* para números complexos (cuja transformada inversa de Laplace resulta em uma senóide de amplitude decrescente). Portanto, merece destaque que não basta seguir os passos da identificação de sistemas, é preciso que o especialista entenda a natureza do sistema que se deseja modelar, analise graficamente os dados de entrada e saída típicos do sistema, e busque definir o espaço de buscas de soluções de modo a auxiliar a convergência do processo de otimização da estimação de parâmetros.

REFERÊNCIAS

BOX, G.; JENKINS, G. **Time Series Analysis**: Forecasting and Control. New Jersey, EUA: Holden-Day Inc., 1976. 575 p. Impresso.

CHUANG, H. D.; *et al.* Development of a dynamic ZIP-motor load model from on-line field measurements. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [*s. l.*], v. 19, n. 7, p. 459-468, 1997. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061597000161. Acesso em: 4 dez. 2019.

ELETROBRAS CEPEL. **Programa Anatem – Análise de Transitórios Eletromecânicos**: Manual do Usuário. 3. ed. aum. Rio de Janeiro, Brasil: [*s. n.*], 2010.

IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE. Load representation for dynamic performance analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, [*s. l.*], v. 8, n. 2, p. 472-482, 1993. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/260837. Acesso em: 4 dez. 2019.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 1. ed. New York City, EUA: McGraw-Hill Inc., 1994. 1176 p. ISBN 0-07-035958-X.

LJUNG, L. **System Identification**: Theory For The User. 2. ed. New Jersey, EUA: PTR Prentice Hall, 1999. 609 p. ISBN 0-13-656695-2.

CIGRE WORKING GROUP C4.605. **Modeling and aggregation of loads in flexible power networks**. [*S. l.*]: Cigré, 2014. Disponível em: https://e-cigre.org/publication/566-modelling-and-aggregation-of-loads-in-flexible-power-networks. Acesso em: 4 dez. 2019.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3. ed. aum. EUA: Springer, 1995. 387 p. ISBN 3-540-60676-9.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. **Procedimentos de Rede Submódulo 18.2**: Modelos Computacionais, 25 mar. 2002.

OPPENHEIM, A. V.; *et al.* **Discrete-time signal processing**. 2. ed. Upper Sadle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999. Impresso.

VISCONTI, Igor; *et al.* Measurement-Based Load Modeling Using Transfer Functions for Dynamic Simulations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 1, p. 111-120, 2014. DOI 10.1109/TPWRS.2013.2279759. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6594923. Acesso em: 4 dez. 2019.

CAPÍTULO 5

INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 10/12/2019

Périson Pavei Uggioni
Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecatrônica
Criciúma – SC
lattes.cnpq.br/6495095860363897

André Roberto de Sousa
Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento Acadêmico de Mecânica
Florianópolis – SC
lattes.cnpq.br/3529253381184642

Anderson Daleffe
Faculdade SATC, Departamento de Engenharia Metalúrgica
Criciúma – SC
lattes.cnpq.br/7569701338186684

Diego Tiburcio Fabre
Instituto Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecatrônica
Criciúma – SC
lattes.cnpq.br/5099028947205509

RESUMO: O conhecimento das características tribológicas dos materiais sujeitos ao desgaste por abrasão é fundamental para a otimização e definição dos elementos de máquinas, e é fator determinante na quantificação da vida útil dos dispositivos mecânicos. Desta forma, é oportuno que laboratórios de Tribologia de universidades ou empresas do setor metal-mecânico possam dispor de máquinas de ensaio denominadas "Tribômetros" que possibilitem reproduzir as condições em que ocorre o desgaste, permitindo classificar materiais e orientar projetistas de máquinas quanto à seleção de materiais adequados para determinada aplicação. Através desse conceito, este trabalho teve por objetivo aprimorar o desempenho por meio da instrumentação, controle e supervisão de um tribômetro conhecido por "Abrasômetro tipo roda de borracha". Os procedimentos de ensaio neste equipamento são padronizados pela norma ASTM G65-16, e novas funcionalidades foram agregadas, tornando-o compatível com outros modelos mais avançados. Avanços, como o ajuste e monitoramento em tempo real de algumas variáveis inerentes ao ensaio, operação automatizada, aumento da segurança, confiabilidade e registro dos dados gerados são alguns dos objetivos alcançados ao final deste projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Automação. Máquinas de ensaio. Abrasômetro.

INSTRUMENTATION, CONTROL AND SUPERVISION OF A DRY SAND/RUBBER WHEEL ABRASION TEST MACHINE

ABSTRACT: Knowledge of the tribological

characteristics of materials subject to wear by abrasion is fundamental for the optimization and definition of machine elements, and is a determining factor in quantifying the useful life of mechanical devices. It is therefore appropriate that tribology laboratories at universities or companies in the metalworking sector should be using test machines called “tribometers,” it is possible to reproduce conditions under which wear occurs, allowing for classification of materials and guidance for designers in their selections. Through this concept, this work aimed to improve performance through the instrumentation, control and supervision of a tribometer known as “Dry Sand/ Rubber Wheel Test Machine.” The test procedures in this equipment are standardized by the American Society for Testing and Materials (ASTM) G65-16 standard and new functionalities are aggregated, making the equipment compatible with other more-advanced models. Advances, such as the adjustment and real-time monitoring of some variables inherent in the test, automated operation, increased safety, reliability and recording of the generated data are some of the objectives achieved at the end of this project.
KEYWORDS: Automation. Testing machines. Dry sand/rubber wheel apparatus.

1 I INTRODUÇÃO

O desgaste de peças não pode ser evitado na prática, mas seu controle é necessário na maioria das aplicações. Com o aumento da frequência de manutenção decorrente do desgaste prematuro, proporcionalmente tem-se o aumento da indisponibilidade da máquina ou equipamento. Em consequência é necessária uma maior quantidade de recursos para substituição ou manutenção da peça desgastada, põe-se em risco a preservação de bens, e há um impacto significativo na segurança dos envolvidos.

Para a *ASM - American Society for Metals* (1992), “um dos grandes desafios na resolução dos problemas de desgaste é antecipar a forma e a intensidade com a qual ele irá ocorrer em um dado componente”. De fato, não é possível reproduzir todas as condições reais a que um determinado material estará exposto (tribosistema), mas é oportuno que nas etapas de projeto de peças ou máquinas, possam ser feitos ensaios e testes laboratoriais que permitam simular e analisar o desgaste, permitindo selecionar os materiais adequados para cada aplicação, estimar sua vida útil, etc.

A Faculdade SATC - Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão de Criciúma-SC, com intuito de promover ensino e pesquisa também na área de Tribologia, fundou em 2015, seu laboratório denominado LDS - Laboratório de Desgaste de Superfície. Uma máquina pertencente ao LDS é conhecida por “Abrasômetro tipo roda de borracha”, no qual é possível desenvolver um ensaio para analisar e classificar materiais quanto à resistência ao desgaste por abrasão. É constituído de uma roda de aço envolvida por um anel de borracha de dureza

especificada, que gira em contato com um corpo de prova, com abrasivo (areia) na interface, provocando a perda de massa. A força normal com que o corpo de prova é pressionado contra a roda de borracha se dá por um braço de alavanca, carregado com um peso morto (carga inercial) especificado. Este método de ensaio é padronizado pela *ASTM - American Society for Testing and Materials*, através da norma *ASTM G65 - Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus* (2016). A Figura 1 representa um ensaio de desgaste em um Abrasômetro (A), Abrasômetro do LDS (B) e corpos de prova após ensaio (C).

Figura 1 – Ensaio de desgaste segundo *ASTM G65-16*.

Fonte: Autores.

Embora funcional, percebeu-se que o abrasômetro do laboratório apresentava algumas limitações: *i)* de segurança, permitindo acesso livre à parte girante e não apresentando botão de parada em situação de emergência; *ii)* de operação, totalmente manual, comprometendo a confiabilidade dos resultados obtidos; *iii)* não permitir o acompanhamento em tempo real e registro dos resultados. Desta forma, este artigo apresenta as ações realizadas com o objetivo de reestruturar uma máquina de ensaio, através de uma nova concepção eletromecânica e principalmente de automação, pertencente ao LDS da Faculdade SATC.

2 I CONCEITO DO PROJETO DE AUTOMAÇÃO

No início do projeto, uma vez caracterizada a necessidade, foi realizada uma pesquisa por máquinas de ensaio de desgaste por abrasão, suas características e funcionalidades. Com as limitações do sistema atual, foi desenvolvido um novo conceito para o Abrasômetro (estrutural e de funcionamento), acarretando em uma nova concepção, com dois modos de funcionamento: mecanizado e instrumentado, selecionados pelo usuário. Um comparativo entre os modos mecanizado e instrumentado de ensaio pode ser encontrado na Tabela 1.

Parâmetros	Abrasômetro mecanizado	Abrasômetro instrumentado
Força normal	Ajuste através da adição de blocos de massa no braço de alavanca, entre 45 e 130 N.	Ajuste por supervisório, aplicada por atuador elétrico e mesa entre 20 e 200 N.
Força tangencial e coeficiente de atrito	Não faz leitura.	Leitura e registro através de supervisório.
Roda de borracha	Ajuste da frequência rotacional na IHM do inversor. Ensaio cronometrado.	Ajuste da frequência rotacional e revoluções no supervisório. Ensaio por deslocamento.
Norma referência	ASTM G65-16	ASTM G65-16
Ajuste de parâmetros e supervisão	Não é possível.	PC com sistema supervisório.

Tabela 1 – Comparativo entre ensaio mecanizado e instrumentado.

.Fonte: Autores (2019).

No modo mecanizado, a operação da máquina não foi alterada em relação ao sistema original (totalmente manual e sem sistema supervisório), necessitando somente a fixação do braço de alavanca a estrutura da máquina. No modo de funcionamento instrumentado, a força normal aplicada ao corpo de prova é obtida através de um mecanismo (motor elétrico e mesa), com intensidade ajustada através do sistema supervisório. Sensores fazem a leitura de algumas variáveis inerentes ao ensaio, como a força tangencial e normal, permitindo que seja então obtido o valor do coeficiente de atrito, além do registro de dados.

A Figura 2 apresenta a nova concepção eletromecânica e de instrumentação do Abrasômetro do LDS da Faculdade SATC.

Figura 2 – Nova concepção do Abrasômetro do LDS.

Fonte: Autores (2019).

3 I DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO MECATRÔNICA DO SISTEMA

Definidas as concepções de projeto do Abrasômetro foram iniciadas as adaptações eletromecânicas e de automação à estrutura original.

3.1 Definição dos sensores e atuadores

Com a instrumentação, a força normal aplicada ao corpo de prova poderá ser ajustada para até 200 N. Desta forma, fez-se um estudo para verificar se o motor elétrico de indução/redutor mecânico instalados na máquina para o acionamento da roda de borracha atendia às novas condições de operação, assim como determinar as características do motor elétrico a ser utilizado para acionamento da mesa. Para este último, mais importante que a velocidade é o torque desenvolvido pelo motor durante a execução do ensaio.

Através da Equação 1 calcula-se a força axial F_A refletida ao eixo motor de acionamento da mesa.

$$F_A = F_N + (\mu_G . m . g) = 200 + (0{,}1 \,.\, 7{,}13 \,.\, 9{,}81) = 207N \quad (1)$$

O torque do motor de acionamento da mesa pode ser calculado pela Equação 2.

$$\tau_{MM} = \frac{F_A \cdot p}{2000 \,.\, \pi \,.\, \eta_{FS}} = \frac{207 \,.\, 5}{2000 \,.\, \pi \,.\, 0{,}9} = 0{,}18Nm \quad (2)$$

Conhecendo-se o torque necessário, inicialmente foram consideradas duas alternativas: motor de passo e servomotor, decidindo-se pelo primeiro (menor custo), trabalhando em conjunto com um *driver* com alta capacidade de corrente de saída (8 A), suficiente para atingir o torque necessário.

Para o acionamento da roda de borracha, considerando um ajuste de força normal F_N máximo de 200 N e um coeficiente de atrito corpo/roda μ_{CR} estimado de 0,6, pela aplicação da Equação 3 determina-se a força tangencial F_T aplicada à roda e pela Equação 4 o torque necessário na saída do redutor para seu acionamento.

$$F_T = \mu_{CR} \cdot F_N = 0{,}6 \,.\, 200 = 120N \quad (3)$$

$$\tau_S = F_T . r = 120 \,.\, 0{,}114 = 13{,}68Nm \quad (4)$$

Através da Equação 5 pode-se calcular o torque de entrada do redutor, exigido do motor de indução.

$$\tau_E = \frac{\tau_S}{(i . \eta_R)} = \frac{13{,}68}{(10 . 0{,}85)} = 1{,}6\ Nm \quad (5)$$

Desejando-se 200 rpm na roda de borracha (requisito de ensaio da norma *ASTM G65*), o motor de 1680 rpm nominal deve ter sua rotação aumentada para 2000 rpm. Desta forma, a frequência elétrica *f* entregue pelo conversor ao motor pode ser calculada pela Equação 6.

$$f = \frac{rpm_{desejado} \cdot f_{nominal}}{rpm_{nominal}} = \frac{2000 \cdot 60}{1680} = 71{,}4Hz \tag{6}$$

Como a frequência de trabalho do motor é maior que a frequência nominal de 60 Hz (região de enfraquecimento de campo), o torque máximo que poderá ser desenvolvido pelo motor da roda será menor que o torque nominal informado pelo fabricante, podendo ser calculado pela Equação 7.

$$\tau_{MR} = \tau_{nominal} \cdot \frac{f_{nominal}}{f} = 3{,}13 \cdot \frac{60}{71{,}4} = 2{,}63Nm \tag{7}$$

Como o torque de entrada do redutor é menor que o torque desenvolvido pelo motor da roda, o conjunto motor e redutor instalados na máquina atendem as condições máximas de ensaio estipuladas.

Com o dimensionamento dos sistemas de acionamento, definiram-se os sensores para o Abrasômetro: *i)* encoder incremental de 1024 pulsos por revolução, que acoplado ao redutor, permite controle em malha fechada do rpm desejado para a roda de borracha; *ii)* célula de carga do tipo resistiva (extensométrica) modelo tipo "*single point",* capacidade máxima de 50 kgf, sensibilidade de 2,0 ± 0,2 mV/V, para medir e controlar em malha fechada a força normal; *iii)* célula de carga do tipo resistiva (extensométrica) modelo tipo "S", capacidade máxima de 30 kgf, sensibilidade de 2,0 ± 0,2 mV/V, para medir a força tangencial; *iv)* para a mesa, foram especificados sensores de fim de curso eletrônicos tipo indutivo, sendo o mesmo tipo de sensor utilizado para detectar abertura da porta de acesso a parte girante da máquina.

3.2 Definição do sistema de controle

Com base no funcionamento pretendido para o Abrasômetro, e análise das características elétricas dos *drivers*, sensores, etc., foi elaborado uma relação das entradas e saídas do sistema. Para o sistema de controle, optou-se por utilizar CLP - Controlador Lógico Programável, pelo critério da compatibilidade elétrica (níveis de tensão) com os sensores e *drivers* e apresentar porta de comunicação e protocolo (Modbus serial) compatíveis com o sistema de supervisão.

3.3 Definição do sistema supervisório

Com o objetivo de reduzir custos na montagem do Abrasômetro, foi adotado

o software ScadaBR, livre e de código aberto do tipo *SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition.* Através de sua interface, é possível ajustar parâmetros *(setup)* e verificar em tempo real variáveis do ensaio em andamento. Ao final, uma planilha pode ser gerada para o registro destes dados.

A Figura 3 apresenta a integração mecatrônica dos componentes e dispositivos do Abrasômetro.

Figura 3 – Integração mecatrônica do Abrasômetro.

Fonte: Autores.

4 I VALIDAÇÃO OPERACIONAL E CALIBRAÇÃO DO ABRASÔMETRO

Para calibração do sistema de medição (modo instrumentado), sobre as células foram posicionadas massas padrão de 5000,0±0,2g e 10000,0±0,2g. Este procedimento deve ser realizado cinco vezes, sendo calculada a média aritmética das indicações. Havendo divergência na força aplicada pelas massas e a indicação no sistema supervisório, é necessário efetuar a correção através do próprio supervisório em campo apropriado. Para a roda de borracha, utilizou-se um tacômetro modelo MDT2238A Minipa, sendo a correção da indicação feita diretamente no conversor de frequência.

Para validação operacional e metrológica do Abrasômetro, diversos ensaios se seguiram, no modo mecanizado e instrumentado. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Parâmetros	Abrasômetro mecanizado	Abrasômetro instrumentado
Média de volume perdido (mm³)	110,403	99,554
Desvio padrão (mm³)	6,257	3,145
Resultado ensaio (mm³)	110,4±6,2	99,5±3,1
Coeficiente de variação (%)	5,6	3,1

Tabela 2 – Comparativo de resultados entre ensaio mecanizado e instrumentado.

Fonte: Autores (2019).

Os dois modos de funcionamento apresentaram resultados condizentes aos especificados na norma *ASTM G65-16.* No modo instrumentado, a média de volume perdido foi 9,9% inferior ao modo mecanizado, apresentando melhor repetitividade dos resultados. Pode-se verificar um aumento na confiabilidade dos resultados, a partir da nova concepção da máquina, já que a redução significativa do coeficiente de variação pode ser traduzida como uma redução do erro aleatório inerente à máquina/sistema de medição.

5 I CONCLUSÃO

Através da automação (instrumentação, controle e supervisão) do Abrasômetro do LDS Faculdade SATC, ensaios de desgaste para caracterização de materiais metálicos foram otimizados (configuração, operação, registro de dados, segurança). Analisando aspectos metrológicos, os resultados obtidos realizados com a concepção instrumentada do Abrasômetro se comparados à concepção mecanizada apresentaram uma menor dispersão. Assim pode-se afirmar que as modificações propostas e realizadas tiveram êxito. Embora seja impossível anular todos os erros de um sistema de medição, pode-se concluir que com este trabalho houve uma redução de suas causas, acarretando em aumento da confiabilidade metrológica. Esta nova concepção da máquina tornou-se uma ferramenta de apoio para projetos na área de Tribologia, seja em nível de ensino ou pesquisa.

6 I NOMENCLATURA

ASM ------ *American Society for Metals*

ASTM ------ *American Society for Testing and Materials*

CLP ------ Controlador lógico programável

LDS ------ Laboratório de Desgaste de Superfície

SATC ------ Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão

SCADA	------	*Supervisory Control and Data Acquisition*
rpm	------	Rotações por minuto
F_A	[N]	Força axial
F_N	[N]	Força normal
F_T	[N]	Força tangencial
f	[Hz]	Frequência
g	[m/s²]	Aceleração gravidade
i	[---]	Redução
m	[kg]	Massa estrutura mesa
p	[mm]	Passo do fuso de esferas da mesa
r	[m]	Raio roda de borracha
τ_E	[Nm]	Torque entrada redutor roda de borracha
τ_S	[Nm]	Torque saída redutor roda de borracha
τ_{MM}	[Nm]	Torque motor acionamento mesa
τ_{MR}	[Nm]	Torque motor acionamento roda de borracha
μ_{CR}	[---]	Coeficiente de atrito corpo de prova/roda
μ_G	[---]	Coeficiente de atrito superfície da guia linear
η_{FS}	[---]	Rendimento do fuso de esferas
η_R	[---]	Rendimento do redutor roda de borracha

REFERÊNCIAS

ASM. **Friction, lubrication and wear technology.** Metals Handbook. 2ª ed., Ohio, 1992.

ASTM. **ASTM G65-16: standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus.** West Conshohocken, 2016.

CAPÍTULO 6

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY E ALGORITMOS DE APRENDIZADO PARA SEQUÊNCIA DE PARTIDA DE PLANTAS INDUSTRIAIS

Data de aceite: 17/03/2020

André da Silva Barcelos
Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Macaé - RJ
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4427908A7

Fábio Muniz Mazzoni
Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense
Rio das Ostras - RJ
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4427908A7

RESUMO: Neste trabalho é desenvolvido um modelo fuzzy-analítico que descreve o comportamento de quatro unidades de processamento de gás natural, localizadas em um parque industrial e que podem operar em paralelo de acordo com a demanda energética nacional. A sequência de partida de unidades de processamento é um problema de decisão estratégica, que consiste em determinar qual das unidades tem prioridade para processar gás natural sob o viés da viabilidade econômica e operacional. Assim, utiliza-se de algoritmos de aprendizado de màquinas, com intuito de determinar a melhor sequência através de um modelo multivariável. A implementação desta proposta acarretou em uma estimativa de redução de desperdícios na produção na ordem de 16% ao mês.

PALAVRAS-CHAVE: Gás natural; Aprendizagem de máquinas; Fuzzy; Tomada de decisão inteligente

DEVELOPMENT OF A FUZZY MODEL AND LEARNING ALGORITHMS FOR INDUSTRIAL PLANT SEQUENCE START

ABSTRACT: This paper presents a fuzzy-analytic model to describe the behavior of four natural gas processing plants located in an industrial facilities which can operate in parallel mode, according to the national energy demand. The starting sequence of processing units is a strategic decision problem that consists of determining which of the units has priority to process natural gas under the bias of economic and operational viability. Thus, this work adopts machine learning algorithms in order to define the sequence of operation in a multivariable model. The implementation of this proposal led to an estimated reduction of waste production in the order of 16% per month.

KEYWORDS: Natural gas; Machine learning; Fuzzy; Intelligent decision making

1 I INTRODUÇÃO

As unidades de processamento de gás natural (UPGN's) que estão localizadas em parques industriais, são instalações que recebem o gás natural (GN) como insumo e tem a finalidade de produzir gás natural processado (GNP). Desta forma, os parques industriais utilizam-se de uma ou mais UPGN's em produçao paralela para a demanda nacional de GNP (Perlotti et al., 2016).

Neste cenário, faz-se necessário definir a sequência de partida das UPGN's, onde considera-se as condições de operação de cada unidade (Gholian et al., 2013). Isto posto, o trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo do comportamento de quatro UPGN's dentro de um parque industrial.

Este modelo de comportamento será utilizado por algoritmos de classifição, com a finalidade de determinar o sequenciamento de partida das UPGN's de acordo com a demanda de GNP. Para a elaboração do modelo, a seção 2 apresenta um resumo do processamento de gás natural com intuito de apontar variáveis e funções do comportamento das UPGN's.

A primeira função que consta no modelo é a estabilidade operacional, que depende das condições de automação, controle e equipamentos da planta industrial e será descrita por lógica fuzzy. As funções de vazão, eficiência da produção e desperdício de insumos são obtidas analiticamente no domínio do tempo. Por fim, a função de operacionalidade é modelada por lógica fuzzy, onde considera-se os aspectos de layout, construção e recursos da UPGN.

Na seção 3, são apresentados os algoritmos de classificação que são: O Technique for Order Preference by Similarity to a Ideal Solution (TOPSIS); Rede Neural Artificial (RNA); Máquina de Vetor Suporte (MVS) e Regressão Logistíca (RegLog). Os experimentos encontram-se descritos na seção 4, a seção 5 analisa os resultados das simulações a seção 6 apresenta a conclusão.

2 I DESENVOLVIMENTO DO MODELO

2.1 Processamento de gás natural

A indústria de beneficiamento do GN utiliza-se de UPGN's em paralelo que devem entrar em operação ou interromper a produção de forma independente. Cada uma das UPGN's contém uma torre de processamento que recebe como insumo o GN (composto de hidrocarbonetos), onde o metano (C1) e o etano (C2) são às frações de menor peso molecular e maior volatilidade que ascendem até o topo da torre de processamento.

O propano (C3), butano (C4) e pentanos (C5+), encontram-se em estado líquido e descem ao fundo da torre de processamento (Kidnay et al., 2011). A Figura

1 mostra o arranjo de quatro UPGN's em um parque industrial.

Figura 1. Fluxograma de Processamento

Conforme observa-se na Figura 2, o GNP é composto de C1 e C2 que ascendem ao topo da torre de processamento e será fornecido ao mercado consumidor, de acordo com a demanda. O líquido de fundo da torre é composto de C_3, C_4 e C_5+ e caracteriza um subproduto que será direcionado para unidades de processamento de líquidos (Mokhata and Poe, 2012).

Figura 2. Torre de Processamento

A seguir serão apresentadas as variáveis e funções que determinam o comportamento de uma UPGN para compreender a dinâmica do processo de produção e construir um modelo.

2.2 Estabilidade Operacional

Para obter a estabilidade operacional, utiliza-se dos conceitos de grau de automação, capacidade de controle e do percentual de equipamentos em stand-by que define as três variáveis de entrada de uma função que retorna como saída a estabilidade operacional.

O grau de automação é definido com a quantidade de variáveis críticas do processo interno, alarmes e malhas de controle, enquanto a capacidade de controle é determinada pela quantidade de malhas estáveis e controláveis que são capazes de manter os processos termodinâmicos estabilizados. A terceira variável de entrada

é a quantidade percentual de equipamentos em standby que remete o potencial de manter a UPGN em operação contínua.

Para obter a estabilidade operacional que é a função de saída, este trabalho utiliza-se da lógica fuzzy e estabelece três superfícies simétricas que avalia as três variáveis de entrada, tomadas duas a duas em relação a estabilidade operacional. A função de pertinência é a trapezoidal com cinco hierarquias (Muito Baixo, Baixo, Adequado, Alto, Muito Alto) e com três superfícies semelhantes à Figura 3.

Figura 3. Superfície da estabilidade operacional

O método de defuzzyficação adotado é o centro de gravidade (COG), que retorna um valor numérico para a estabilidade operacional de acordo com as três variáveis de entrada.

2.3 Vazão da produção

Para medir a vazão de produção de GNP (μp(t)), utiliza-se da integração do volume produzido vp(t) conforme a equação 1.

$$\mu p(t) = \int_{t=0}^{t} vp(t)dt \qquad (1)$$

O resultado da equação 1 torna possível obter a vazão máxima (μp(max)) de produção e por conseguinte construir a Tabela 1. A unidade de processamento A produz a maior vazão de GNP possível (μp(max) = 1) quando comparada com as demais unidades.

UPGN	A	B	C	D
μmax	1,0000	1,0000	0,9074	0,9359

Tabela 1. Vazão da produção

2.4 Eficiência da produção

A vazão de produção de GNP (μp(t)) e a vazão de insumo (ip(t)) são utilizadas para medir a eficiência (ξ(t)) da produção. Para realizar este cálculo, toma-se a razão da vazão de produção pela integração da vazão de insumo através da equação 2:

$$\xi(t) = \frac{\mu p(t)}{\int_{t=0}^{t} ip(t)dt} \tag{2}$$

O valor de ξ(t) representa a eficiência em que uma UPGN consegue transformar a fração de C1 e C2 do GN em produto ao longo do tempo. A Tabela 2 apresenta a eficiência média da produção ξmed de cada UPGN.

UPGN	A	B	C	D
ξ*med*	0,9231	0,7058	0,7003	0,8874

Tabela 2. Eficiência média da produção

2.5 Desperdício de insumo

Define-se como desperdício de insumo (μd) o volume de GN admitido na torre de processamento que por descontrole ou desvios operacionais é impedido de converter-se em produto especificado.

Isto ocorre quando as frações de C3, C4 ou C5+ ascendem indevidamente ao topo da torre de processamento e entram na composição do GNP. Nesta condição todo o produto que sai pelo topo da torre de processamento encontra-se desespecificado e deve ser reprocessado ou descartado no sistema de rejeito.

O reprocessamento consiste em injetar o produto desespecificado na entrada de insumo da torre e esta manobra acarreta em retrabalho e redução da eficiência da produção. A equação 3 permite obter o volume reprocessado (μ_r).

$$\mu r = \int_{t=0}^{t} \mu r(t)dt \tag{3}$$

O sistema de rejeito é uma instalação industrial com a finalidade de descartar o gás que ascendeu ao topo da torre e encontra-se desespecificado. Obtém-se pela equação 4 a totalização do volume rejeitado (μj).

$$\mu j = \int_{t=0}^{t} \mu j\ (t)dt \tag{4}$$

O volume de gás desperdiçaado é medido por meio da equação 5 e consiste na média harmônica do volume de gás reprocessado com o volume de gás enviado ao sistema de rejeito. A escolha da média harmônica consiste na possibilidade de ponderar o custo do reprocessamento e do rejeito.

$$\mu d = \frac{2}{\frac{1}{\mu r}+\frac{1}{\mu j}} \quad (5)$$

A Tabela 3 é o resultado da equação 5 e demonstra o volume de desperdício de cada UPGN. Por definição faz-se necessário minimizar esta equação de acordo com as práticas de otimização da produção.

UPGN	A	B	C	D
μmédio	0,1419	0,1180	0,1312	0,1074

Tabela 3. Volume de desperdício

2.6 Operacionalidade

As UPGN's apresentam diferenças de layout, tecnologia, modelo de construção e particularidades em suas instalações que influenciam a capacidade de partir e operar adequadamente. Para obter a operacionalidade, utiliza-se da lógica fuzzy para criar uma superfície que avalia as três variáveis de entrada que são: o tempo de partida; os recursos necessários e o tempo de estabilização conforme observa-se na Figura 4:

Figura 4. Mapa de regras da operacionalidade

A função de pertinência adotada é a trapezoidal com cinco hierarquias (Muito Baixo, Baixo, Adequado, Alto e Muito Alto) e com três superfícies simétricas relacionadas duas a duas em função da Operacionalidade. O método de defuzzyficação adotado é o centro de gravidade que retorna um valor numérico de acordo com as três variáveis de entrada.

3 I ALGORITMOS PARA CLASSIFICAC¸ A˜O

Realizou-se testes em algoritmos de aprendizado, regressores, redução dimensional, árvores de decisão e heurísticas com a finalidade de classificar corretamente os resultados do modelo proposto.

Os algoritmos que apresentaram os melhores resultados para a classificação do modelo foram o TOPSIS, a rede neural, a máquina de vetor suporte e a regressão logística que estão descritos nas próximas subseções.

3.1 TOPSIS

O algoritmo Technique for Order Preference by Similarity to a Ideal Solution (TOPSIS) é definido como um método multicritério, onde mede-se a distância euclidiana entre todas as alternativas possíves com a solução ideal (Şengül et al., 2015).

Conceitualmente define-se que a melhor alternativa (D+) encontra-se com a menor disância euclidiana possível para a solução ideal e por conseguinte, a pior alternativa (D–), encontra-se o mais próximo possível da solução não ideal (Hwang and Yoon, 1981).

O método TOPSIS avalia a matriz de alternativas da Figura 5 com todas as alternativas possíveis A_i associadas aos atributos C_j (Şengül et al., 2015).

$$A = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \dots \\ A_i \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & \dots & C_j \end{array} \\ \left\{ \begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} \end{array} \right\} \end{array}$$

Figura 5. Matriz de alternativas

O processo de execução do TOPSIS pode é em uma sequência de etapas, onde avalia-se a construção da matriz de alternativas ponderadas (Behzadian et al., 2012). A seguir encontram-se as etapas descritas em detalhes.

• Construção da matriz de alternativas ponderadas: Utiliza-se de um vetor de pesos (w_1, w_2, ...w_n) que deve ser fornecido pelo especialista para ponderar as alternativas em cada critério. Devido à questão cognitiva, o especialista pondera as alternativas de maneira incoerente e entende-se que a determinação de pesos torna-se induzida (Zavadskas and Podvezko, 2016).

Uma forma de obter pesos para solucionar problemas onde prevalece a indução humana, é utilizar-se de teorias e métodos que por definição são independentes do especialista. Um desses métodos calcula a medida de incerteza ou entropia do

sistema e mede o estado de desordem ou inconsistÊncia em um dado momento (Ormos and Zibriczky, 2014).

O conceito de entropia na atribuição de pesos representa uma medida de estado momentâneo, onde espera-se que quanto maior for a inconsistência do sistema, maior será a entropia (Joshi and Kumar, 2014). Para este trabalho, os pesos (w_1, w_2, ...w_n) são obtidos pela entropia da matriz de alternativas de acordo com as equações 6, 7 e 8.

$$ej = -\frac{1}{\ln(m)}\sum_{i=1}^{m} \text{xij} \ln(\text{xij}) \tag{6}$$

$$dj = 1 - ej \tag{7}$$

$$wj = \frac{dj}{\sum_{j=1}^{m} dj} \tag{8}$$

Uma vez que obtenha-se a entropia conforme a equação 6, utiliza-se da equação 7 e 8 para obtenção do vetor de pesos wj. A matriz de alternativas ponderadas vij tem a forma descrita na equação 9, onde rij são os valores (xij) da matriz de alternativas A normalizada.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \tag{9}$$

Vale salientar que a matriz ponderada é independente do especialista, pois neste caso realiza-se a determinação dos pesos (wij) através da entropia dos valores (xij) da matriz A (Yentes et al., 2013).

• Cálculo da similaridade: Define-se como similaridade a distância euclidiana de cada alternativa à solução ideal. Nesta etapa, calcula-se a similaridade da matriz ponderada, tanto para a solução ideal (D+), quanto para a solução não ideal (D^-), conforme as equações 10 e 11.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}[vij(x) - v+(x)]^2} \tag{10}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}[vij(x) - v_j^-(x)]^2} \tag{11}$$

Ao final, utiliza-se da equação 12 para ordenar as alternativas e propor a solução do sequenciamento de partida, onde o vetor ki apresenta um ranking de alternativas obtidas através da entropia da matriz A (xij).

$$k_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \tag{12}$$

3.2 Rede Neural Artificial

A rede neural artificial é uma ferramenta computacional utilizada para classificação de dados com a possibilidade de estabelecer relações não lineares entre entrada e saída (Yegnanarayana, 2009)

Espera-se que as redes neurais tenham a capacidade de aprender através da melhoria de um critério de desempenho por um processo iterativo de ajustes de pesos da rede (Behbahani et al., 2009). A taxa de aprendizagem e os pesos influenciam no tempo de processamento da rede neural e desta forma faz-se necessário definir um critério de parada, onde fica estabelecido que a partir deste momento, a rede encontra-se treinada (Witten et al., 2016).

Durante o treinamento, obtém-se o percentual de acertos na classificação para um tempo de processamento. Ao dobrar-se o tempo de processamento, deve ocorrer a convergência do percentual de acertos até um limite temporal definido como critério de parada (Yegnanarayana, 2009).

3.3 Máquina de Vetor Suporte

Um algoritmo de máquina de vetor suporte (MVS) disponibiliza os dados no espaço e desenvolve hiperplanos de complexidade ajustável, com a finalidade de separar os dados em categorias distintas (Smola and Schölkopf, 2004). Desta forma, uma MVS é utilizada como um algoritmo classificador, regressor ou identificador de outliers (Cristianini and Shawe-Taylor, 2000).

Os hiperplanos são criados de acordo com a base de dados e o algoritmo utiliza-se de uma margem de separação, que permite uma correta classificação das instâncias (Smola and Schölkopf, 2004). Devido as instâncias deste trabalho, faz-se necessário a redução do custo computacional com a finalidade de convergir à solução. Assim, utiliza-se da classificação binária iterativa que propaga erros, porém retorna resultados viáveis (Witten et al., 2016).

3.4 Regressão Logística

Um algoritmo que utiliza-se de regressão para classificação encontra aplicação em domínios numéricos, pois entende-se que quaisquer técnicas de regressão, pode ser utilizada para classificação (Hosmer Jr et al., 2013). A forma multivariável do algoritmo de RegLog pode ser aplicada em domínios que existem três ou mais possibilidades de classificação, onde os resultados devem ser ordenados (Menard, 2002).

Outrossim, admite-se que os valores de máximo e mínimo de uma base de dados situam-se no limite superior e inferior das escalas. Por conseguinte, atualizam-se os parâmetros da curva, para que a função logística torne-se ajustada aos dados

durante a fase de treinamento (Witten et al., 2016).

4 I EXPERIMENTOS

O modelo descrito nas seções anteriores é representado numericamente em uma matriz 4x5, onde cada coluna são respectivamente os valores da estabilidade operacional, vazão de produção, eficiência, desperdício de insumo e operacionalidade de cada UPGN. Esta matriz é a representação numérica do modelo do comportamento que varia ao longo do tempo.

Este trabalho utiliza-se do histórico de 1072 matrizes (instâncias) de acordo com o modelo, que representam a partida e operação de plantas reais com intuito de realizar as simulações. Assim, quando um algoritmo computa estas instâncias, espera-se que o resultado seja o sequenciamento de partida.

O sequenciamento indicado pelo algoritmo é representado através de uma palavra, na qual a sequência de letras está disposta em ordem de preferência, como por exemplo a palavra cbda onde a UPGN C tem a prioridade da partida seguida da B e assim, sucessivamente. Isto posto, fica estabelecido que o modelo contém 20 entradas e 24 saídas e que o algoritmo utiliza-se de 1072 instâncias obtidas através de histórico.

Cada algoritmo contém parâmetros que podem ser ajustados iterativamente para melhorar o desempenho da classificação em detrimento do aumento do tempo de computação. Estes ajustes de parâmetros são realizados em simulações sucessivas através da redução do erro relativo.

Uma vez que não ocorra redução de erro relativo em duas simulações sucessivas ou melhoria do desempenho com ajuste de parâmetros, fica determinado que atingiu-se o critério de parada da simulação.

4.1 TOPSIS

O algoritmo TOPSIS retorna 771 instâncias classificadas corretamente e observa-se resultados ambíguos. Este fato reside na forma em que o algoritmo classifica suas instâncias e busca soluções.

Uma vez que o método baseia-se em ordenar soluções que se encontram na menor distância da solução ideal e por conseguinte na maior distância da solução não ideal. Fica evidente que em uma base de dados podem existir instâncias com os módulos aproximadamente iguais para a solução ideal e não ideal, pórem com sentidos distintos.

A ordenação ambígua do método TOPSIS é imperceptível em modelos de ordem três ou com número de instâncias reduzidos (10 a 20). Porém quando a

ordem do modelo aumenta e o número de instâncias ultrapassa algumas centenas o algoritmo apresenta ambiguidade.

4.2 Regressão Logística (RegLog)

Este algoritmo retorna 994 (92,72%) instâncias classificadas corretamente e aponta as palavras bcad e bacd como as que apresentam os maiores erros de classificação, com nove e sete instâncias respectivamente.

Ao observar a computação deste algoritmo, percebe-se que por seis vezes as instâncias que deveriam ser classificadas como bcad, são classificadas como bacd. Por outro lado, as instâncias que deveriam ser classificadas como bacd, são classificadas como bcad quatro vezes.

Fica evidente que quando a palavra inicia-se por b e termina com d, as letras do meio apresentam ambiguidade na classificação. Como experimento removeu-se as palavras bacd e bcad da classificação e o resultado da simulação atingiu o 94,87% de acertos.

4.3 Rede Neural Artificial (RNA)

Este algoritmo consegue classificar 1001 (93,37%) instâncias corretamente após 65 simulações, onde realizam-se todos os ajustes necessários aos parâmetros da rede.

A avaliaçao dos resultados mostra que a instância que deveria ser classificada como dcba é classificada incorretamente em cinco ocasiões como cdba. Por outro lado, a palavra cbda é classificada como dcba seis vezes e evidencia que a rede apresenta uma região de ambiguidade.

4.4 Máquina de Vetor Suporte (MVS)

Este algoritmo classifica 1034 (96,45%) instâncias corretamente após 225 simulações com tempo de processamen to na ordem de horas. A região ambígua para este algoritmo situa-se nas palavras cbda e bcda, com quatro e três classificações erradas respectivamente.

5 I ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este trabalho utiliza-se de quatro métricas para a análise dos resultados e validação da simulaçãao. A primeira métrica é o percentual de instâncias classificadas corretamente por cada algoritmo (%cts) enquanto que a segunda métrica é a raiz quadrada do erro médio da melhor classificação (rqm).

A terceira métrica é o número total de simulações completas que permitiram

o ajuste iterativo de pesos e consequentemente, o aumento de desempenho da rede (nts). Por fim, a quarta métrica é o tempo total de processamento de todas as simulações (tts). Na Tabela 4 encontra-se um resumo das métricas adotadas.

Métrica	%cts	rqm	Nts	tts
TOPSIS	71,92	0.0961	60	00:15:25
RegLog	92,72	0.1380	163	00:56:25
RNA	93,37	0.0816	65	31:12:15
MVS	96,45	0.1925	225	01:15:20

Tabela 4. Métricas adotadas

Observa-se que a MVS apresenta o maior percentual de acertos para a classificação correta das instâncias, em um tempo total de simulação em aproximadamente 1 hora e 15 minutos. Por outro lado, a rede neural artificial necessita de um tempo de simulação próximo de 32 horas para conseguir um resultado inferior à MVS.

A raiz quadrada do erro médio (rqm) leva em conta todas as classificaçães das instâncias erradas e pondera sobre o quanto estariam distantes das instâncias corretas. Assim, afirma-se que os erros de classificação cometidos pelo algoritmo MVS tem maior magnitude que os erros cometidos pelos demais algoritmos.

6 I CONCLUSÃO

A decisão do sequenciamento de partida de plantas industriais é estratégica para as empresas inseridas na atividade de processamento, pois trata-se da produção de gás natural em um cenário de demanda nacional. Esta responsabilidade fica à cargo dos gestores destas unidades que devem determinar o sequenciamento de partida empiricamente.

Desta forma, este trabalho propõe um modelo fuzzy analítico, que utiliza-se de fatores operacionais e econômicos para determinar um modelo comportamento das UPGN's e definir o sequenciamento de partida, utilizando-se do algoritmos de máquina de vetor suporte.

Outra análise que pode ser realizada é que com este modelo, torna-se possível prever as deficiências operacionais de cada unidade e gerenciar recursos para investimentos ou manutenção com a finalidade de melhorar o desempenho na produção e operação. Este trabalho encontra-se em andamento e estima-se (baseado em histórico) que o lucro cessante encontra-se minimizado com uma redução do desperdício na ordem de 16% ao mês.

Como sugestão para trabalhos futuros, existe a possibilidade de aplicação

para diferentes tipos de plantas industriais. Um exemplo caraterístico são os parques de compressão de gás natural e bombeamento de petróleo, que contém bombas industriais de grande porte e turbinas á gás que operam em paralelo e são responsáveis pelo envio de produto ao mercado consumidor.

REFERÊNCIAS

BEHBAHANI, R.M., JAZAYERI-RAD, H., HAJMIRZAEE, S. **Fault detection and diagnosis in a sour gas absorption column using neural networks**. Chemical engineering & technology, (2009).

BEHZADIAN, M., et al. **A state-of the-art survey of topsis applications**. Expert Systems with applications, (2012).

CRISTIANINI, N., SHAWE-TAYLOR, J. **An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods**. *Cambridge university press, (2000).*

GHOLIAN, A., et al,. **Optimal industrial load control in smart grid: A case study for oil refineries**. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1–5. IEEE, (2013).

HOSMER Jr, D.W., LEMESHOW, S., STURDIVANT, R.X. **Applied logistic regression**, volume 398. John Wiley & Sons, (2013).

HWANG, C.L.,YOON, K. **Methods for multiple attribute decision making**. In Multiple attribute decision making, 58–191. Springer, (1981).

JOSHI, D. and KUMAR, S. **Intuitionistic fuzzy entropy and distance measure based topsis method for multi-criteria decision making**. Egyptian informatics journal, (2014).

KIDNAY, A.J., PARRISH, W.R., MCCARTNEY, D.G. **Fundamentals of natural gas processing**. CRC press, (2011).

MENARD, S. **Applied logistic regression analysis**, volume 106. Sage, (2002).

MOKHATA, S., POE, W.A. **Handbook of natural gas transmission and processing**. Gulf professional publishing, (2012).

ORMOS, M. and ZIBRICZKY, D. **Entropy-based financial asset pricing**. PloS one, (2014).

PERLOTTI, E.A., SANTOS, E.M.d., and COSTA, H.C.d.M. **Concentração espacial da indústria de São Paulo: evidências sobre o papel da disponibilidade de gás natural**. Estudos avançados, (2016).

ŞENGÜL, Ü., et al. **Fuzzy topsis method for ranking renewable energy supply systems in turkey**. Renewable Energy, (2015).

SMOLA, A.J., SCHOLKOPF, B. **A tutorial on support vector regression**. Statistics and computing, (2004)

WITTEN, I.H., FRANK, E., HALL, M.A., PAL, C.J. **Data Mining: Practical machine learning tools and techniques**. Morgan Kaufmann. (2016).

YEGNANARAYANA, B. **Artificial neural networks**. PHI Learning Pvt. Ltd. (2009).

YENTE, J.M., et al. **The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets**. Annals of biomedical engineering, (2013)

ZAVADSKAS, E.K.,PODVEZKO, V**. Integrated determination of objective criteria weights in mcdm**. International Journal of Information Technology & De- cision Making, (2016).

CAPÍTULO 7

SIMULAÇÃO DE SINTONIZAÇÃO DE AUTOMÁTICA PARA UM CONTROLADOR PID EM UMA PLANTA NÃO-LINEAR USANDO ALGORITMO GENÉTICO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 07/12/2019

Diogo Aparecido Cavalcante de Lima
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/2013978292322934

Hiago Araújo Silva
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/6602695000385581

Alexandre Carvalho Silva
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/7471848591836966

Maurício José Aureliano Júnior
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/5323209083313394

Alexandre Cardoso
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/3767009717402045

Edgard Afonso Lamounier Júnior
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG
http://lattes.cnpq.br/0239619592699303

RESUMO: O controlador PID (proporcional, integral, derivativo) é um dos algoritmos de controle mais difundido no ambiente industrial Ele é um algoritmo robusto, de fácil entendimento e capaz de obter resultado satisfatório para uma grande gama de processos industriais. Todavia, 96% de todos os controladores na indústria são PID, por isso ter controladores bem sintonizados e ferramentas que possam acompanhá-los ao longo do tempo e auto sintonizá-los quando necessário é um fator diferencial, pois diminui-se o custo e aumenta-se a produtividade. Entretanto apesar de difundido seu desempenho muitas vezes está abaixo do esperado. Nos últimos anos diversos trabalhos acadêmicos, propõem combinação de diversos métodos e tecnologias para maximizar o desempenho dos controladores PID, e este trabalho propõem a utilização de algoritmos genéticos para encontrar os valores de sintonização proporcional, integral, derivativo um controlador PID utilizando o ambiente de programação Matlab juntamente como sua ferramenta de simulação Simulink.

PALAVRAS-CHAVE: controlador PID; ajuste automático; algoritmo genético.

AUTOMATIC TUNING SIMULATION FOR A PID CONTROLLER ON A NONLINEAR PLANT USING GENETIC ALGORITHM

ABSTRACT: The PID controller (proportional, integral, derivative) is one of the best-known control algorithms in the industrial environment. It is a robust algorithm, easy to understand and able to obtain satisfactory results for a wide range of industrial processes. However, 96% of all controllers in the industry are PIDs, so having well-tuned controllers and tools that can accompany them over time and auto tune them when needed is a differential factor as it decreases the cost and increases productivity. However, although widespread, its performance is often below expectations. In recent years several academic papers have proposed combining several methods and technologies to maximize the performance of PID controllers, and this work propose the use of genetic algorithms to find the values of proportional, integral, derivative tuning a PID controller using the programming environment Matlab along with its Simulink simulation tool.

KEYWORDS: PID controller; automatic adjustment; Genetic Algorithm.

1 I INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas de controle automáticos são utilizados em diversos setores da indústria tais como: controle de qualidade, linha de montagem, sistema de transportes, sistemas de potência, tecnologia espacial, robótica dentre várias outras (FACCIN, 2004). Basicamente a ideia de um sistema de controle é controlar de alguma maneira as saídas de algum sistema através de suas entradas. Em um sistema automático essa realimentação se torna de difícil controle, pois cada ação retorna uma reação diferente. Todavia essa retroalimentação torna o controle mais rápido, precisa menos sensível a erros.

Porém, a cada realimentação, as entradas podem ser totalmente diferentes da anterior, deixando a velocidade de resposta abaixo do esperando (VISHAL, 2014). Assim sendo, métodos de otimização são bem-vindo, para atuar no processo de retroalimentação de controladores PID.

Dentre os vários métodos de otimização existentes, os algoritmos genéticos destacam-se por conseguir fazer buscas em extremamente eficientes em um grande espaço de soluções possíveis (LINDEN, 2012). No campo da inteligência computacional os algoritmos genéticos simulam a mesma técnica de evolução feita pelos seres vivos ao longo de milhares de anos.

Este trabalho, tem como objetivo geral utilizar técnicas de algoritmo genético para encontrar respostas automáticas para os valores de entrada de um controlador PID não linear. Ele tem como objetivos específicos: revisão bibliográfica de Controladores PID e de Algoritmo Genético; desenvolver um protótipo utilizando o ambiente de programação Matlab e o ambiente de simulação Simulink.

2 I CONTROLADORES PID

Existem três controladores básicos que são: proporcional, integral e derivativo. A união destes três controladores fez surgir o controlador PID, que produz um dos mais eficientes algoritmos de controle já desenvolvido (FACCIN, 2004). O controlador proporcional, integral, derivativo ou simplesmente controlador PID, é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativas, integrais e proporcionais, "onde o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações" (LOURENÇO, 1997). A validação do algoritmo do controlador PID é dada pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

"Onde, u(t) é saída do controlador, e(t) é erro, K_p é ganho proporcional, K_i é ganho integral e K_d é ganho derivativo" (VISHAL, 2014).

Porém a teoria de controle clássica, é adequada para resolução de problemas de processos lineares e, geralmente, falha no tratamento de alguns processos complexos devido as não-linearidades e comportamentos variantes no tempo" (VISHAL, 2014). Os controles avançados normalmente são usados para superar limitações das técnicas convencionais.

O diagrama de blocos da Figura 1 ilustra um sistema de controle PID de um processo. Normalmente, deseja-se que a saída global acompanhe as alterações do sinal de referência (set-point) de entrada.

Figura 1 - Controlador PID para sistemas não-lineares.

O procedimento de seleção dos parâmetros, K_p, K_i e K_d, do controlador PID de modo a serem atendidas as especificações de desempenho, é conhecido como sintonia do controlador. A escolha adequada destes parâmetros torna possível o

ajuste suave e preciso dos controladores.

Figura 2 - Controlador PID para sistemas não-lineares.

O método Ziegler e Nichols propunha regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental a uma excitação em degrau, ou no valor de Kp que resulta em estabilidade marginal para o controle proporcional apenas. A ideia básica é obter valores para os ganhos a partir de experimentos sobre o processo. As regras são muito utilizadas, sempre que o processo a ser controlado permite, por fornecerem um ponto de partida para um ajuste mais fino.

Figura 3 - Degrau de um controlador PID.

3 I ALGORITMO GENÉTICO

Os Algoritmos genéticos baseiam-se na teoria evolucional proposta por Charles Darwin que propõe que o indivíduo evolui de acordo com as possibilidades que seu ambiente te proporciona. Sendo assim, o indivíduo se adapta naturalmente ao

ambiente em que vive e essas características são passadas naturalmente de geração para geração por meio da transmissão de informações genéticas. Os indivíduos fortes têm maiores probabilidades de se reproduzirem que os indivíduos fracos. Toda reprodução gera um novo indivíduo único e com características próprias. Este indivíduo pode ser mais forte ou mais fraco que os seus ascendentes (LINDEN, 2012).

Os AGs (Algoritmos Genéticos) aplicam a teoria da evolução de Charles Darwin nos algoritmos da computação. Eles funcionam mantendo uma população formada por n indivíduos/cromossomos que possuem genes que podem ser cruzados com outros indivíduos gerando assim novos indivíduos.

Esta evolução se dá por meio de três operadores genéticos que são: seleção, cruzamento e mutação que está exemplificado na figura a seguir.

Figura 4 - Fluxo de funcionamento do Algoritmo Genético.

Antes de aplicar os três operadores genéticos, o algoritmo genético começa na geração de uma população inicial que posteriormente será evoluída. Esta população geralmente é aleatória e pode ou não ter alguma restrição como por exemplo, conter números dentre a faixa de -5.00 e 5.00.

Em seguida a geração da população inicial começa o trabalho do operador de seleção que é responsável pela escolha de quais indivíduos participaram do processo de cruzamento. Existem várias técnicas utilizadas pelos operadores de seleção, porém este artigo explica somente a técnica de seleção por torneio que foi utilizado na implementação.

“O método de seleção por torneio consiste em selecionar uma série de indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição direta pelo direito de

ser pai, usando com arma sua aptidão" (LINDEN, 2012). Para cada cruzamento deveram ser realizados pelo menos dois torneios que resultaram em pelo menos dois elementos (pai 01 e pai 02). Este método assim como os outros usa como critério de avaliação a função de aptidão onde os indivíduos serão avaliados.

Figura 5 - Dois indivíduo que ganharam o sorteio.

Após a escolha dos pais começa a etapa de cruzamento/recombinação onde operador de cruzamento que cruza dos valores genéticos dos pais, gerando novos filhos que possuem partes de ambos os pais. Para isso, é necessário escolher um ponto de corte de forma aleatória no cromossomo de um indivíduo. Depois obter o ponto de corte, os dados genéticos são trocados. Porém estabelece que a probabilidade que o cruzamento aconteça, normalmente está probabilidade é de 80%.

Figura 6 - Exemplo de cruzamento com 1 ponto de corte.

Terminada a etapa de cruzamento começa a etapa de mutação que também simula a teoria de Charles Darwin. Esta etapa tenta simular a interferência do ambiente exterior que em algumas vezes pode ocasionar mutação no indivíduo, porém está mutação fica condicionada normalmente a apenas 1% de probabilidade de acontecer. Se ela acontecer escolhe uma posição aleatória do cromossomo e muta o cromossomo do indivíduo.

Figura 7 - Exemplo de mutação simples de 1 ponto.

Depois da aplicação dos três operadores genéticos chega-se a uma nova população que será submetida a todas as etapas novamente até que a condição solicitada seja atendida. Veja o pseudocódigo da estrutura de funcionamento do algoritmo genético a seguir:

Algoritmo Genético - Pseudocódigo

- 1º Inicializa a população de indivíduos

Enquanto não termina faça

- 2º Avalie a População
- 3º Selecione os Pais
- 4º Cruzamento/Recombinação
- 5º Mutação
- 6º Nova População

Fim Enquanto

- Valores Desejados

Existem *n* técnicas que melhoram os operadores de cruzamento, porém neste trabalho foi utilizado apenas a técnica de elitismo que garante que o melhor indivíduo desta geração sempre estará presente na geração na posterior.

4 I PROBLEMA PROPOSTO

O problema de controle PID ótimo consiste em obter-se os valores de K_p, K_i e K_d de forma que o desempenho do sistema seja o melhor possível. Ou seja, um controlador ótimo é um controlador que faz com que o desempenho do sistema seja, no mínimo, tão bom quanto o possível de ser obtido com qualquer outro controlador (ALMEIDA, COELHO, 2001).

Figura 8 - Controlador PID para sistemas não-lineares com AG.

5 I DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Após a revisão bibliográfica sobre o tema de sistemas não-lineares e algoritmo genético. Foi desenvolvido um protótipo que utiliza algoritmo genético para seleção de valores de K_p, K_i e K_d para sintonização de automática para um controlador PID. Para seu desenvolvimento foi utilizado interface de programação Matlab, juntamente com ambiente de simulação Simulink.

O algoritmo genético adotado foi a implementação por parâmetros contínuos onde se utiliza números reais.

6 I IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

Primeiramente foi gerada a população inicial de forma aleatória dentro do intervalo permitido. Sendo que cada indivíduo(cromossomo) representa um conjunto solução possível. Cada cromossomo contém 3 genes referentes a K_p, K_i e K_d, cada gene possui um valor real que deve estar dentro do intervalo permitido.

A escolha dos pais, aconteceu por meio do método de seleção torneio, onde são sorteados 3 indivíduos por vez e escolhe-se o mais apto dele para ser o pai. Juntamente com o método torneio foi utilizado o elitista, onde conserva-se sempre o mais apto da geração anterior.

Para o cálculo da função de aptidão é utilizada a seguinte função:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Esta função que avalia cada cromossomo sorteado pelo método torneio. O indivíduo apto mais será o que apresentar o menor valor da função de aptidão.

Utilizando operadores genéticos, tais como cruzamento e mutação, aplicados no algoritmo são gerados novos indivíduos para tentar encontrar uma melhor solução para o problema. Foi implementado o método crossover de Cruzamento Linear e Mutação Uniforme.

No cruzamento linear é calculado três filhos conforme as fórmulas. Para que mantenha o tamanho da população (dois pais gerando dois filhos), avalia-se os três filhos e o pior deles é descartado, deixando os outros dois com melhor avaliação. Para gerar novos filhos são utilizadas as fórmulas matemáticas propostas por (WRIGHT, 1991).

$$\frac{1}{2}pai_1 + \frac{1}{2}pai_2 \qquad \frac{3}{2}pai_1 - \frac{1}{2}pai_2 \qquad \frac{1}{2}pai_1 + \frac{3}{2}pai_2$$

O operador de mutação é aplicado após a geração dos filhos, para cada gene, com uma baixa probabilidade, o gene tem seu valor trocado. O operador de mutação que atua sobre o gene, troca por outro valor aleatório conforme o operador de mutação, podendo variar um pouco ou complemente o valor do gene. Este número aleatório deve respeitar a faixa de valores validos para a função. Após a mutação verifica-se se os valores contidos dentro de cada gene obedecem aos valores pré-estabelecidos. Se algum valor não estiver dentro faixa permitida o cromossomo é excluído e realiza-se o sorteio novamente.

Posteriormente, realiza-se o método de seleção por torneio para escolha de dois dentre os três cromossomos resultantes. Estes dois cromossomos serão conhecidos como $filho_{01}$ e $filho_{02}$ ambos estarão presentes na nova população.

7 I NORMAS PARA SEÇÕES ADICIONAIS

Por meio de observação, percebe-se que o algoritmo genético juntamente com os operadores utilizados chega ao resultado satisfatório, encontrando os valores de K_p, K_i e K_d.

Os primeiros testes foram realizados utilizando a quantidade de 50 indivíduos para a população e 50 gerações para que o AG faça seu papel de encontrar os melhores indivíduos. As figuras 9 e 10 mostram resultados obtidos com estes parâmetros e pode-se observar que a linha vermelha, referente ao valor da função de aptidão do melhor indivíduo, é crescente ao longo das gerações e busca aproximar-se do valor unitário. Esta busca acontece, pois, a função de aptidão escolhida considera que quando o erro se aproximar de 0 a aptidão tende a 1.

Figura 9 - Teste 1 com 50 indivíduos e 50 gerações

Figura 10 - Teste 2 com 50 indivíduos e 50 gerações

8 I CONCLUSÕES

Ao utilizar o método de seleção por Torneio, sempre o melhor indivíduo é escolhido, pois sempre o melhor vence na evolução de Darwin. A seleção dos indivíduos para realizar o torneio é feita de modo aleatório, recrutando vários indivíduos bons e ruins, alguns possuem a aptidão bem baixas, outros não, e nessa seleção aleatória o melhor indivíduo pode ser recrutado e com isso sua vitória é garantida. O método elitista normalmente colabora de forma drástica para o desempenho do método torneio, pois ele garante que a genética sempre irá evoluir positivamente. O algoritmo genético mostrou-se capaz de encontrar solução ótima.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Otacílio M.; COELHO, Antônio AR. **Controlador PID com Escalonamento Nebuloso dos Ganhos: Auto-Sintonia, Análise e Implementação**. V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente–V SBAI, 2001.

FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**, 2004.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos Genéticos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2012. 475p.

LOURENÇO, João. **Sintonia de controladores PID**. Escola superior de tecnologia,1997.

VISHAL, Vikrant, et al. **Online PI controller tuning for a nonlinear plant using genetic algorithm**. Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH), 2014 Innovative Applications of. IEEE, 2014.

WRIGHT, Alden H. et al. **Genetic algorithms for real parameter optimization**. Foundations of genetic algorithms, v. 1, p. 205-218, 1991.

CAPÍTULO 8

CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO PARA UM ROBÔ PARALELO COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CONFECCIONISTA

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 01/12/2019

Caruaru - Pernambuco

http://lattes.cnpq.br/7052566931981129

Asafe dos Santos Silva
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Pernambuco
Caruaru - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/6824084815076072

Acarcio Gomes de Almeida Júnior
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Pernambuco
Caruaru - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/7322106762564366

Alexander Patrick Chaves de Sena
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Pernambuco
Caruaru - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/8631506695880007

João Manoel Freitas Souza
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Pernambuco
Caruaru - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/5000524686165266

José Lucas Moreira Cavalcanti de Abreu
Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia de Pernambuco

RESUMO: Este artigo descreve a concepção eletromecânica e o controle de posição de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta com três graus de liberdade para aplicação na indústria confeccionista. A proposta busca uma solução para a diminuição das não conformidades nos acabamentos mecânicos da indústria confeccionista de jeans, onde os efeitos de desgaste do tecido são comumente obtidos por processos manuais comprometendo a padronização do produto final. O conjunto eletromecânico é acionado por meio de motores de corrente contínua e interfaceados por circuitos de potência com técnica PWM, que recebem sinais de controle de um sistema computadorizado. Foi estudado um modelo matemático para associação das coordenadas dos carros de movimentação e o efetuador final. Foram implementados controladores de posição do tipo Proporcional-Integrador-Derivativo (PID) por meio do método de sintonização de Ziegler-Nichols. Foi criado um programa supervisório em Labview® que permite a visualização das saídas e entradas dos controladores de posição por meio de gráficos plotados em tempo real, possibilitando o ajuste das constantes PID também em tempo real. Os controladores foram validados e testados

para cada carro de movimentação, apresentando um erro máximo de posicionamento de 2,14% e velocidade de 100mm/s, o que foi considerado ótimo para a aplicação confeccionista.
PALAVRAS-CHAVE: Protótipo, controle PID, arquitetura paralela, robô delta, sistema de posicionamento.

CONSTRUCTION AND POSITION CONTROL FOR A PARALLEL ROBOT WITH APPLICATION IN THE CLOTHING INDUSTRY

ABSTRACT: This article describes the electromechanical design and position control of a prototype with parallel delta kinematic structure with three degrees of freedom for application in the confectionary industry. The proposal seeks a solution for the reduction of nonconformities in the mechanical finishes of the jeans confectionary industry, where the wear effects of the fabric are commonly obtained by manual processes compromising the final product standardization. The electromechanical assembly is driven by direct current motors and is interfaced by PWM power circuits, which receive control signals from a computerized system. It was studied a mathematical model to associate the coordinates of the moving cars and the final effector. Position controllers of the Proportional-Integrator-Derivative (PID) type were implemented using the Ziegler-Nichols tuning method. A supervisory program was created in Labview® that allows the visualization of the outputs and inputs of the position controllers by means of graphs plotted in real time, allowing the adjustment of PID constants also in real time. The controllers were validated and tested for each movement car, presenting a maximum positioning error of 2,14%, which was considered to be optimal for the confectionary application.
KEYWORDS: Prototype, PID controller, parallel architecture, delta robot, positioning system.

1 I INTRODUÇÃO

A necessidade da criação de produtos com alto valor agregado induziu a indústria confeccionista a desenvolver tratamentos especiais para as matérias-primas têxteis capazes de garantir características atrativas ao uso, e enquadramento no mercado da moda. As peças podem ser imersas em produtos como enzimas, pigmentos e corantes; podem, ainda, sofrer o atrito de pedras especiais, ou até passar por recursos mecânicos e artesanais, como nos lixados, puídos e esmerilhados. A maioria dos processos de acabamentos em jeans é realizada com o auxílio de instrumentos para cada tipo diferente de efeito. Na etapa de diferenciados (used, reapped, puídos, pintura, etc.), as técnicas são geralmente realizadas manualmente, existindo uma série de fatores que podem comprometer o produto final (ANDRADE, 2014). No acabamento manual, o risco de não conformidade é maior, e podem depender de fatores ambientais (temperatura do ambiente, ruídos, etc.), carga horária, fatores

emocionais, alta rotatividade, falta de treinamento entre outros (ANDRADE, 2014).

Em busca de uma solução para a diminuição das não conformidades nos acabamentos da indústria confeccionista, observou-se que o deslocamento espacial dos robôs paralelos se assemelha aos movimentos dos operadores ao executar um acabamento manual. Outra observação interessante para a aplicação é que quando comparadas às estruturas seriais, as paralelas podem ser instaladas sobre o posto de trabalho, não ocupando espaço no chão de fábrica. Recentemente algumas pesquisas foram publicadas descrevendo o uso da arquitetura paralela para concepção de robôs específicos, tais como: Chiang, Lin e Hou (2011); Riaño, Peña e Pardo (2014); Lin, Luo e Lin (2015); Sena, Silva e Silva (2017), Almeida Júnior et al. (2018a) e Almeida Júnior et al. (2018b).

As arquiteturas paralelas despertam grande interesse por apresentar uma boa rigidez associada à exatidão do posicionamento, possuindo capacidade de carga maior que as tradicionais arquiteturas seriais. Estes dispositivos podem operar com grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais. A possibilidade dos robôs paralelos de operarem com altas acelerações e alta exatidão gerou a necessidade do desenvolvimento de sistemas de controle de alto desempenho (FILHO, 2006). Esses controladores exigem a solução das equações dinâmicas da máquina em tempo real (MERLET, 2006). A modelagem matemática é uma tarefa essencial para o controle de posição de mecanismos paralelos, e consiste em calcular as coordenadas das articulações correspondentes a uma configuração específica do efetuador (posição e orientação). Para uma arquitetura paralela, a cinemática inversa é uma tarefa simples e pode ser realizada pela observação geométrica. A cinemática de mecanismos paralelos é fundamentalmente diferente da cinemática dos mecanismos seriados. Cada arquitetura paralela possui características cinemáticas particulares dificultando a aplicação de equações generalistas. A obtenção das equações cinemáticas dos mecanismos paralelos requer a análise de cada cadeia, relacionando as coordenadas das juntas com as coordenadas da plataforma móvel (FILHO, 2006).

Este trabalho propõe a descrição da construção e do controle de posição de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta linear de 3 Graus de Liberdade (GDL). O protótipo é capaz de realizar o papel de manipulador aplicado a indústria confeccionista, utilizando motores de corrente contínua (CC) e fusos de esferas recirculantes para movimentação dos carros transportadores.

2 I METODOLOGIA

2.1 Sistema Eletromecânico

O desenvolvimento do protótipo foi estruturado em algumas etapas, como

apresentado na Fig.(1).

Figura 1. Metodologia para o projeto do robô paralelo.

Fonte: Adaptado de Lin, Luo e Lin (2015).

Os três sistemas posicionadores (carros A, B, e C) utilizados são uma associação de componentes mecânicos tais como fusos, guias, mancais e rolamentos. Os sistemas de posicionamento apresentam um curso útil de 500 mm em guias tipo BR 15, com estrutura confeccionada em alumínio. Os fusos são de esferas padrão SFU1605 com passo de 5 mm, diâmetro de 16 mm, apresentando uma precisão de 0,08mm. A máquina trabalha com controle de posição e trajetória do tipo PID, e possui um programa supervisório em software de programação LabView® que permite a visualização das saídas (posições finais) e entradas (posições de referências) por meio de gráficos plotados em tempo real, possibilitando o ajuste das constantes do controlador em tempo real.

Os encoders incrementais adquiridos (5326-2222-0100 da Hohner®) permitem uma resolução de 100 Pulsos/volta, gerando na combinação dos dois canais, um código Gray de 400 estados/volta. Com base no passo dos fusos (5mm) é possível relacionar cada estado gerado nos encoders, ao deslocamento dos sistemas lineares. O conversor A/D utilizado é o módulo de aquisição (DAQ), NI USB-6353 que se comunica com o software Labview®.

A DAQ apresenta 4 saídas analógicas com 2,86 MS/s, 16-bit de resolução, com sinais variáveis e programáveis de ±5VCC. Apresenta também 48 entradas digitais para leitura dos sensores de fim de curso, e 4 contadores/temporizadores de 32 bits para leitura dos encoders. Para realizar o controle dos motores, utilizaram-se placas

de potência controladas por PWM do tipo EM-176 da Electromen™, baseadas em Pontes-H.

Foram utilizados motores de corrente contínua da Ignis Motors® (MR20A-024150) de 24VCC e 8A (150W e 2000 RPM) para realizar o acionamento de fusos com esferas recirculantes. A Fig.(2) apresenta o robô paralelo fabricado para aplicação da indústria confeccionista.

Figura 2. Mecanismo do robô paralelo proposto.

Fonte: Autoria própria.

2.2 Modelo matemático e controle

O modelo cinemático foi desenvolvido com base em uma análise geométrica do protótipo. Definindo alguns pontos na máquina, como pode ser observado na Fig.(3), é possível determinar as posições de cada carro.

Figura 3. Vista frontal e superior do robô paralelo.

Fonte: Almeida Junior (2018a).

Cada carro e seus elementos foram representados pelos números 1, 2 e 3. Os carros estão conectados aos fusos nos pontos D, que por consequência estão ligadas as hastes, de comprimento L, pelos pontos A. Os sistemas de posicionamento estão ligados a trizeta (peça central) fixa pelos pontos C. As hastes de movimentação estão ligadas ao efetuador nos pontos B. O ponto O está fixado no centro da trizeta fixa, e o ponto F é o centro do efetuador. Por convenção, define-se que o ponto A1 está localizado no eixo x. Dessa forma, considerando que a ponta da ferramenta esteja posicionada na origem do espaço cartesiano, olhando de cima para o centro do robô, a haste do sistema 1 está sobre o eixo x. Os pontos A_2, B_2, C_2 e D_2 estão posicionados a 120º no sentido anti-horário, enquanto que os pontos A_3, B_3, C_3 e D_3 estão a 240º, no mesmo sentido. O ponto F representa o centro da ferramenta

instalada no efetuador. A distância do centro do efetuador aos pontos B_1, B_2 ou B_3, e do centro da trizeta aos pontos C_1, C_2 ou C_3 é uma constante representada por OE, ou Offset do Efetuador. Definidos todos os pontos de interesse, é possível estabelecer as relações que determinam as coordenadas dos pontos B_1, B_2, B_3.

A análise cinemática da estrutura apresenta o seguinte modelo que associa as coordenadas do ponto F (X, Y, Z) aos deslocamentos lineares dos carros 1 (A), 2 (B) e 3 (C), conforme (1), (2) e (3).

$$L^2 = (a_{1x} - b_{1x})^2 + (a_{1y} - b_{1y})^2 + (a_{1z} - b_{1z})^2 \quad (1)$$

$$L^2 = (a_{2x} - b_{2x})^2 + (a_{2y} - b_{2y})^2 + (a_{2z} - b_{2z})^2 \quad (2)$$

$$L^2 = (a_{3x} - b_{3x})^2 + (a_{3y} - b_{3y})^2 + (a_{3z} - b_{3z})^2 \quad (3)$$

O diagrama de blocos do controle implementado é apresentado na Fig.(4). A expressão do controlador PID discretizado é apresentado em (4).

$$u(t) = K_p e(t) + ui(kt) + K_i e(t)T + K_d \frac{e(t) - e(kt)}{T} \quad (4)$$

onde K_p é o ganho proporcional do sistema; K_i é o ganho integral do sistema; K_d é o ganho derivativo do sistema; T é o período de amostragem; $e(t)$ é o erro atual do sistema; $e(kT)$ é o erro no instante anterior ao atual; $ui(kT)$ é o valor integral no instante anterior ao atual e $u(t)$ é a saída PID propriamente dita do sistema.

A técnica de sintonização por Ziegler e Nichols, propõem regras de sintonia para as constantes de um compensador PID, baseadas em experimentos de resposta ao degrau ou em alterações de ganho de um compensador puramente proporcional que leve um sistema à instabilidade marginal. Essa técnica se mostra eficaz para quando se trabalha com um sistema que é permitido uma pequena faixa de erro.

Foi criado um programa supervisório em software de programação LabView® que permitiu a visualização das saídas (posições finais) e entradas (posições de referências) por meio de gráficos plotados em tempo real, possibilitando o auto ajuste das constantes PID em tempo real.

Figura 4. Diagrama de controle do mecanismo paralelo.

Fonte: Autoria própria.

2.3 Acabamento em jeans

Geralmente o processo de acabamento em jeans (puído, lixamento ou reapped) é realizado por meio de usinagem abrasiva com micro retífica, onde uma ferramenta em contato permanente com a superfície do tecido realiza movimentos de oscilação muito rapidamente, enquanto o produto se movimenta de forma lenta. Para realização dos acabamentos, os abrasivos aderem ao tecido se movimentado com pressão sobre a peça. A Fig.(5) apresenta o processo manual de acabamento abrasivo por lixamento e puído.

Figura 5. Acabamento manual por lixamento e por puído.

Fonte: Autoria própria.

Um disco (corte ou tubo de lixa grão) ou escova abrasiva de micro retífica são as ferramentas geralmente utilizadas para obtenção do puído e lixamento. A velocidade de corte empregada (rotação da ferramenta) é obtida experimentalmente, pois depende das propriedades do tecido trabalhado, do acabamento superficial desejado, do tipo e material da ferramenta empregada (lixa de grão 60, 120 ou 240). A velocidade de avanço é obtida a partir da malha de controle, bem como o tamanho do efeito a ser realizado no tecido (controle de posição).

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os melhores resultados do controle obtidos por meio do método de sintonização Ziegler-Nichols foram com os ganhos apresentado na Tabela 1.

	K_p	K_i	K_d
Carro A	0,6500	0,0000	0,0005
Carro B	1,0000	0,0100	0,0000
Carro C	0,7500	0,0000	0,0002

Tabela 1. Ganhos PID.

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 6, 7, e 8 são apresentadas as respostas dos movimentos A, B, e C respectivamente, quando impostas as entradas de 30mm (mecanismo subindo e descendo). Estes deslocamentos são mínimos para o acabamento do puído.

Figura 6. Respostas do controle do carro A para entradas de 30mm e -30mm.

Fonte: Autoria própria.

Figura 7. Respostas do controle do carro B para entradas de 30mm e -30mm.

Fonte: Autoria própria.

Figura 8. Respostas do controle do carro C para entradas de 30mm e -30mm.

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 9, 10, e 11 são apresentadas as respostas dos movimentos A, B e C respectivamente, quando impostas as entradas de 150 mm (mecanismo subindo e descendo). Estes deslocamentos são considerados máximos para o acabamento do puído.

Figura 9. Respostas do controle do carro A para entradas de 150mm e -150mm.

Fonte: Autoria própria.

Figura 10. Respostas do controle do carro B para entradas de 150mm e -150mm.

Fonte: Autoria própria.

A Fig.(12) apresenta as respostas dos carros A, B e C quando impostas as entradas tipo rampas.

Figura 11. Respostas do controle do carro C para entradas de 150mm e -150mm.

Fonte: Autoria própria.

Figura 12. Respostas do controle dos carros A, B e C para entradas em rampas.

Fonte: Autoria própria.

4 I CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a concepção eletromecânica e o controle de posição de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo robô delta para aplicação na indústria confeccionista. O conjunto eletromecânico foi acionado por motores de corrente contínua (CC) com técnica PWM, interfaceados por circuitos drivers de potência (ponte H), que receberam sinais de controle de um sistema computadorizado (módulo multifuncional de sinais e software Labview®). Por fim, um controlador PID foi testado e validado para cada carro transportador com erro máximo de posicionamento de 2,14% com velocidade de 100mm/s. O controle foi realizado de forma individual dos graus de liberdade do robô. Dessa forma, em trabalhos futuros será implementado um controle de trajetória definida nas coordenadas X, Y e Z, para utilizar de forma efetiva os 3 graus de liberdade do robô. Além disso, o protótipo vem se mostrando

eficaz na sua aplicação no setor confeccionista.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco), pelo apoio financeiro na realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

Almeida Júnior, A.G. et al. (2018a). **Desenvolvimento e Controle de Robô Delta para Manipulação Industrial**. In: II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa. *Anais do II COINTER PDVGT*.

Almeida Júnior, A.G. et al. (2018b). **Projeto Eletromecânico e Controle de Robô Paralelo Tipo Linapod**. In: II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa*. Anais do II COINTER PDVGT*.

Andrade, L.S. (2014). **Gestão da Qualidade e a Melhoria Contínua de Processos Terceirizados de Beneficiamento Jeans: Um Estudo de Caso Realizado em Uma Empresa de Moda de Criciúma, Santa Catarina**. *Universidade do Extremo Sul Catarinense*.

Chiang, M-H.; Lin, H-T. and Hou, C-L. (2011). **Development of a Stereo Vision Measurement System for a 3D Three-Axial Pneumatic Parallel Mechanism Robot Arm**. In *Sensors 2011*, vol. 11, pp. 2257-2281.

Lin, J.; Luo, C-H. and Lin, K-H. (2015). **Design and Implementation of a New Delta Parallel Robot in Robotics Competitions**. In International Journal of Advanced Robotic Systems, *Int J Adv Robot Syst*, 2015, 12:153 I doi: 10.5772/61744.

Merlet, J.P. (2006). ***Parallel Robots***. 2 ed. Netherlands, Springer.

Riaño, C.; Peña, C. and Pardo, A. (2014). **Approach in the Optimal Development of Parallel Robot for Educational Applications**. In Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation, *At held in Cambridge*, MA USA, Vol. 14.

Sena, A.P.C.; Silva, A.V.S. and Silva, A.S. (2017). **Construction and Control PID of Delta Parallel Robot**. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba. *Anais do 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. v. 1.

CAPÍTULO 9

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA DE CONTROLE HÍBRIDA PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE ALTA PRESSÃO

Data de aceite: 17/03/2020

Data da submissão: 02/12/2019

Murilo Ferreria Vitor
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis – Santa Catarina
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6950949782045602

Alexsandro dos Santos Silveira
POLO - Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis – Santa Catarina
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5261889275418789

Guilherme Matias
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis – Santa Catarina
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9406201424778831

Rodolfo César Costa Flesch
Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis – Santa Catarina
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4070109317911706

RESUMO: Este trabalho propõe uma estrutura de controle híbrida para sistemas de refrigeração de alta pressão. A metodologia foi aplicada para o controle de pressão em um calorímetro para compressores que utilizam o dióxido de carbono como fluido refrigerante, substituindo a válvula antes operada manualmente. O calorímetro opera com um intervalo de pressão de sucção de (20 a 50) bar e de pressão de descarga de (75 a 105) bar. O ciclo de refrigeração funciona com três níveis de pressão, que são definidos por duas válvulas automáticas industriais com motores de passo acoplados. Um controle híbrido formado por um controle linear seguido por um controle chaveado de três níveis foi desenvolvido de modo a conduzir as pressões para os valores desejados. Um driver de comando foi projetado e desenvolvido para interpretar os sinais de controle e atuar sobre as válvulas automáticas. Com a estrutura de controle proposta foi possível obter um modelo satisfatório do compressor com os pontos obtidos automaticamente, em menos da metade do tempo, quando comparado com a operação manual, tornando o calorímetro muito mais ágil e estável para uma vasta gama de condições de funcionamento. Além de fornecer resultados mais rápidos, a estrutura de controle proposta também apresentou robustez nos ensaios de rejeição de perturbação e confiabilidade nos testes de seguimento de referência, atendendo os requisitos de projeto da estrutura de controle.

PALAVRAS-CHAVE: Controle híbrido;

Calorímetro de alta pressão; Refrigeração com dióxido de carbono; Válvulas automáticas industriais; Avaliação experimental.

DEVELOPMENT OF A HYBRID CONTROL STRUCTURE FOR HIGH PRESSURE REFRIGERATION SYSTEMS

ABSTRACT: This paper proposes a hybrid control structure for high pressure refrigeration systems. The methodology was applied for controlling pressure in a calorimeter for carbon dioxide compressors, replacing a valve that was operated manually. The calorimeter works with a pressure range from (20 to 50) bar for suction and (75 to 105) bar for discharge. The refrigeration cycle works with three pressure levels and two automatic valves with internally coupled stepper motors. A hybrid control comprising a linear control followed by a three level switching control was developed in order to get the pressures to the desired values. A command driver was designed and implemented to interpret the control signals and drive the valves. With the proposed control structure, it was possible to obtain a satisfactory compressor model with only automatic tests, in less than half the time, when compared to the manual operation, making the calorimeter faster and stable for a wide range of working conditions. In addition to providing quicker tests, the proposed control structure showed also robustness in disturbance rejection tests and reliability in reference tracking tests, meeting the control structure project requirements.
KEYWORDS: Hybrid control; High-pressure calorimeter; Carbon dioxide refrigeration; Automatic industrial valves; Experimental evaluation.

1 I INTRODUÇÃO

O compressor é uma parte essencial de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor, os mais comumente utilizados nos dias atuais (Belman-Flores et al., 2015). O uso de calorímetros está diretamente ligado à caracterização deste componente em diversas condições de operação. Entender as características do compressor melhora o controle de qualidade e permite a criação de compressores mais eficientes.

Diversos trabalhos na literatura são dedicados ao desenvolvimento de calorímetros. Joffily e Pimenta (2006) propuseram uma bancada para avaliação de compressores de ar condicionado e refrigeradores de pequeno e médio porte por meio de um ciclo superaquecido alternativo. Silveira et al. (2014) desenvolveram um calorímetro compacto de ciclo quente específico para microcompressores lineares. Silveira et al. (2015) desenvolveram um calorímetro para compressores que utilizam dióxido de carbono como fluido refrigerante, que é o objeto deste trabalho.

Para um calorímetro feito para compressores que utilizam como fluido refrigerante dióxido de carbono, altas pressões de sucção e descarga são necessárias para atingir

as condições de ensaio desses compressores (Frutuoso Junior, 2014). É necessário ensaiar os compressores em diferentes condições de funcionamento, o que requer uma mudança nas pressões de sucção e descarga entre cada ensaio realizado. Utilizar uma válvula manual para tais mudanças, além de ser um trabalho repetitivo, traz risco para o operador. A substituição dessas válvulas por válvulas automáticas traz segurança, e também uma maior agilidade para alcançar a condição de operação necessária para os ensaios. Alguns trabalhos recentes mostraram as vantagens da aplicação de técnicas de controle em bancadas de teste de compressores de refrigeração (Dangui et al., 2017; Schwedersky et al., 2018).

O objetivo deste trabalho é automatizar o controle das pressões de sucção e de descarga de um calorímetro para compressores que usam dióxido de carbono como fluido refrigerante. Com esta adição se faz necessária a criação de uma estratégia de controle para as válvulas automáticas, para que as pressões de sucção e de descarga alcancem de maneira rápida os valores desejados, além de manterem-se nesses valores para cada condição de funcionamento. Neste trabalho um controle híbrido foi desenvolvido para este fim, compreendendo um controlador linear do tipo PI em série com um controlador não linear chaveado de três níveis.

O trabalho está dividido em 5 seções. Esta seção fez uma breve introdução à calorímetros e ao controle aplicado em sistemas de refrigeração, além de apresentar o problema a ser resolvido pelo presente trabalho. O aparato experimental é mostrado na Seção 2, o desenvolvimento da estratégia de controle é mostrado na Seção 3, e os resultados obtidos estão na Seção 4, que contempla os ensaios de validação da estrutura de controle proposta e também o cálculo do modelo de um compressor, para evidenciar os ganhos provenientes da utilização da estrutura de controle desenvolvida. Na Seção 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas do trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 I APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental, um calorímetro de ciclo quente para compressores de dióxido de carbono (figura 1), foi construído de maneira modular, de modo a conter não somente o circuito de refrigeração, mas também o sistema de aquisição, o quadro elétrico e o compartimento de ensaio de compressor (Silveira et al., 2015). Todas as temperaturas são medidas com termopares do tipo T com ±0,5 °C de incerteza de medição. O controle da temperatura da linha de sucção é feito com um aquecedor flexível preso ao tubo controlado por um controlador PID combinado com a ação de um trocador de calor de convecção forçada tubo-aleta. No compartimento de teste há o controle da temperatura com um sistema de refrigeração auxiliar devido à alta transferência de calor proveniente do corpo do compressor, e controle da velocidade

do ar com a ajuda de um ventilador radial de velocidade variável.

O foco do presente trabalho, o controle das pressões de sucção e de descarga, é feito com duas válvulas manuais micrométricas Swagelok série M, com orifício de 1,42 mm e resposta linear. Em paralelo, duas válvulas de expansão eletrônicas Danfoss SAGInoMIYA série UKV foram adicionadas para o controle das pressões de sucção e de descarga. Estas válvulas de resposta não linear contam com motores de passo de ímã permanente acoplados que comandam uma válvula agulha com orifício de 1,4 mm, e possuem fim de curso por catraca, o que reduz problemas relacionados à atuação próximo das regiões limites de abertura e fechamento, não as deixando travar. As válvulas manuais continuaram no sistema, podendo ser utilizadas como uma opção de ajuste manual das pressões, ou para o ajuste fino junto com as automáticas, e também para segurança. Um reservatório intermediário de aço inoxidável com um volume de 2,25 litros foi instalado entre as linhas de sucção e descarga para acomodar o excesso de fluido refrigerante e permitir que o calorímetro opere em uma vasta variedade de condições com uma única carga de fluido. O compressor utilizado nos ensaios é do tipo alternativo com deslocamento volumétrico de 0,7 cm³. Estes compressores normalmente são empregados em produtos como expositores de bebidas, que utilizam CO2 como fluido refrigerante.

Figura 1: Calorímetro de ciclo quente para compressores de dióxido de carbono.

Para o comando das válvulas de expansão eletrônicas, um driver de motor de passo (figura 2) utilizado em Silveira et al. (2014) foi adaptado. O driver é composto por três circuitos integrados (CIs). O CI L297 é responsável por habilitar e desabilitar

o driver por meio de comandos discretos de nível lógico TTL, comando de direção no sentido horário e anti-horário (CCW, do inglês counterclockwise), e também permite ajustar a corrente e receber sinal de gerador de função externo ou interno, implementado com o CI 555. O driver conta com um circuito integrado de potência CI L298 ponte H para alimentação e inversão do sentido de giro do motor. Por fim, foi recalculado um circuito com oito diodos de roda livre de ação rápida, para suportar a corrente necessária que circula pela bobina da válvula, visto que os diodos anteriores não suportavam tal corrente. Com este driver foi possível utilizar meio passo no acionamento das válvulas, melhorando a resolução de atuação.

Figura 2: Driver de acionamento da válvula automática.

3 I ESTRUTURA DE CONTROLE PROPOSTA

Neste trabalho foi desenvolvido um controle híbrido constituído por um controle linear (controlador PI) seguido de um controle não linear (controle chaveado com três níveis). O controlador PI foi concebido com o intuito de atender aos requisitos de seguimento de referência, rejeição de perturbações, baixo sobressinal e tempo de resposta rápido perante mudanças de referência. Já o controle chaveado com três níveis foi concebido para definir o sentido da rotação da válvula automática, além de parar o funcionamento da mesma nas situações em que as condições de regime permanente são alcançadas.

3.1 Controlador PI

A escolha do controlador PI para fazer parte da estrutura de controle deve-se ao fato de que os controladores PI são amplamente conhecidos em virtude da sua simplicidade, robustez, capacidade de seguimento de referências constantes e rejeição de perturbações. A equação (1) apresenta a função de transferência do controlador PI no domínio de Laplace, onde K_c é o ganho proporcional e T_i é a

constante de tempo integral.

$$C(s) = k_c\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \tag{1}$$

Para projetar o controlador PI é necessário calcular os parâmetros K_c e T_i, que são obtidos a partir do modelo matemático do sistema. Para o cálculo desse modelo, primeiramente foram realizados ensaios para determinar o comportamento do sistema, que inclui as válvulas automáticas, o compressor e todo sistema de refrigeração. As figuras 3 e 4 apresentam o comportamento estático do sistema perante variações de abertura das válvulas automáticas da descarga e da sucção. Foram realizadas aberturas de 10% em cada iteração, variando de 0% até 100% de abertura. Enquanto uma das válvulas variava, a outra permaneceu com uma abertura fixa de 50%. As regiões destacadas em azul são as regiões próximas ao fim de curso das válvulas, e por essa razão foram evitadas. Pode-se notar que quanto maior a abertura das válvulas, maior é a linearidade da resposta. Comparando os ensaios, percebe-se que o comportamento estático em ambos é similar, invertendo-se apenas o sentido, dado que o comportamento da válvula da descarga é inversamente proporcional ao comportamento da válvula da sucção.

A partir do comportamento estático, pôde-se determinar duas regiões nas quais as válvulas apresentam um comportamento mais linear, como é mostrado nas figuras 3 e 4. Em cada região foi aplicado o método da resposta ao degrau para a identificação do sistema (Åström e Hägglund, 1995). Com base nos ensaios realizados, um modelo de primeira ordem com atraso foi obtido para cada região, conforme a equação no domínio de Laplace:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \tag{2}$$

onde Y é a saída, U é a entrada, K_p é o ganho estático, θ é o atraso de transporte e τ é a constante de tempo.

Como deseja-se controlar as válvulas em toda a sua região de atuação, foi obtido um modelo de primeira ordem a partir da média entre os modelos das regiões 1 e 2. Os parâmetros dos modelos finais da dinâmica da pressão de descarga e da dinâmica da pressão de sucção são apresentados na tabela 1.

Dinâmica	k_p	τ	θ
Descarga	-0,41	4,13	0,5
Sucção	0,36	4,43	0,5

Tabela 1: Parâmetros dos modelos finais.

Figura 3: Curva estática do sistema para variações de abertura da válvula automática da descarga.

Figura 4: Curva estática do sistema para variações de abertura da válvula automática da sucção.

O controlador PI foi projetado através do método do lugar das raízes (Ogata, 2002). As especificações consideradas no projeto foram de seguimento de referência constante com erro nulo em regime permanente, sistema em malha fechada mais rápido que em malha aberta, sobressinal menor que 10% para mudanças de referência e rejeição de perturbações do tipo constante. A tabela 2 mostra os parâmetros dos controladores PI da válvula de descarga e da válvula de sucção.

Válvula	k_c	T_i
Descarga	-4,8	2,5
Sucção	6,5	2,86

Tabela 2: Parâmetros dos controladores.

3.2 Controlador chaveado de três níveis

Para tornar possível o controle das válvulas por meio da ação de controle calculada pelo controlador PI, foi necessário desenvolver um controle chaveado em três níveis. Isso ocorre porque os drivers responsáveis pelo acionamento das válvulas automáticas recebem apenas comandos que definem o sentido de rotação do motor de passo acoplado internamente, além de permitir que a válvula permaneça em uma mesma posição.

Baseado nisso, o controle chaveado divide a ação de controle proveniente do controlador PI em duas regiões, sendo que o nível superior corresponde ao sentido anti-horário, e o nível inferior ao sentido horário. Adicionalmente, quando a resposta do sistema está próxima o suficiente da referência, o controle chaveado fixa a abertura da válvula automática, parando a rotação do motor de passo. Obtêm-se então, os três níveis do controle chaveado, anti-horário, horário e parado.

A figura 5 apresenta a estrutura final do controle híbrido desenvolvido, utilizado separadamente em cada válvula.

Figura 5: Estrutura do controle híbrido.

4 I RESULTADOS

Um conjunto de testes foi realizado para avaliar o desempenho da estrutura de controle híbrida desenvolvida. Foram realizados testes de seguimento de referência na pressão de descarga e de sucção do compressor. Realizaram-se também, testes de rejeição de perturbação. Além disso, um conjunto de pontos experimentais foi obtido para a modelagem do compressor.

4.1.Testes de seguimento de referência

Com o intuito de avaliar o desempenho da estrutura de controle híbrida, testes de seguimento de referência foram realizados na válvula automática da descarga e da sucção.

A figura 6 apresenta o resultado do teste de seguimento de referência da válvula da descarga. Na execução desse teste, a pressão de sucção foi mantida próxima a 25 bar. Variou-se a pressão de descarga de 60 bar até 78 bar, realizando mudanças

de referência de 3 bar a cada 2 minutos. Pode-se notar que para essa condição de teste, a válvula automática da descarga alcança a abertura de fim de curso, para a pressão de 78 bar. Nessa situação, independente da ação de controle calculada, não é possível restringir mais o fechamento da válvula, devido a limitação física da válvula. A figura 7 mostra uma região mais aproximada do teste da descarga, no qual observa-se que os requisitos de projeto foram atingidos, obtendo um baixo sobressinal, e um tempo de resposta menor que o de malha aberta.

Figura 6: Teste de seguimento de referência da descarga.

Figura 7: Seguimento de referência da descarga (zoom).

A figura 8 apresenta o resultado do teste de seguimento de referência da válvula da sucção. Na execução desse teste, a pressão de descarga foi mantida próxima a

75 bar. Variou-se a pressão de sucção de 33 bar até 21 bar, realizando mudanças de referência de 1 bar a cada 2 minutos. A figura 9 mostra uma região mais aproximada do teste da sucção, na qual observa-se que os requisitos de projeto foram atingidos, obtendo uma resposta praticamente sem sobressinal, além de um tempo de resposta menor que o de malha aberta. Nesse teste, percebe-se com maior clareza como funciona o controle chaveado de três níveis, onde o controle chaveia em torno da referência, e quando encontra-se muito próximo da mesma, chaveia para a condição na qual a atuação da válvula é parada, fixando a abertura da válvula, como ocorre no instante de 6 minutos até aproximadamente 8 minutos.

Figura 8: Teste de seguimento de referência da sucção.

Figura 9: Seguimento de referência da sucção (zoom).

4.2 testes de rejeição de perturbação

Para analisar o desempenho e a robustez do controle híbrido desenvolvido para a situação na qual ambas as válvulas automáticas funcionam simultaneamente, testes de rejeição de perturbação foram realizados. A figura 10 mostra um desses testes, onde ocorre uma mudança de referência na pressão de descarga de 65 bar a 75 bar. Pode-se perceber que o controle da válvula da descarga mantém as características projetadas. Observa-se também que essa mudança de pressão na descarga não afeta a pressão de sucção, já que a mesma está sendo controlada pelo controle híbrido.

Figura 10: Teste de rejeição de perturbação.

4.3 modelagem do compressor

Vinte e quatro pontos experimentais foram obtidos dentro das condições de operação do compressor utilizado. Foi constatado que para a atual configuração do calorímetro, as válvulas automáticas podem funcionar simultaneamente, desde que a diferença de pressão entre a descarga e a sucção seja de no máximo 50 bar. Nove desses pontos foram obtidos com as válvulas automáticas em funcionamento simultâneo (pontos preenchidos em vermelho na figura 11). Um ponto foi obtido de maneira semiautomática (ponto preenchido em azul na figura 11), onde a válvula da sucção foi controlada automaticamente, e a válvula de descarga foi controlada manualmente, devido à grande diferença de pressão entre a descarga e a sucção. Os outros pontos da matriz foram obtidos utilizando as válvulas manuais (pontos não preenchidos na figura 11), devido ao fato de a diferença de pressão imposta pelo circuito de refrigeração sobre as válvulas ser maior que 50 bar. Somente os pontos obtidos com as válvulas automáticas foram usados na modelagem do compressor.

Figura 11: Matriz de ensaios.

O modelo proposto por Li (2012) é um modelo físico, pois baseia-se nas equações fundamentais da teoria de compressores e utiliza as eficiências volumétricas e global para calcular a vazão mássica e potência consumida. Neste modelo existem dois coeficientes relacionados ao volume morto (b_1 e b_2) e um coeficiente de perda de carga (D_p) entre a sucção e a entrada da válvula de admissão do compressor (equações (3) e (4)). A potência consumida, por sua vez, é calculada com base nos fenômenos ocorridos durante a compressão do fluido e nas perdas mecânicas e elétricas segundo a equação (5). Os coeficientes a_1, a_2, a_3, e a_4 devem ser ajustados através de, no mínimo, sete pontos experimentais.

$$\eta_v = b_1 + b_2 \left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}(1 - D_p)} \right)^{\frac{1}{k}} \tag{3}$$

$$\dot{m} = \frac{\eta_v D_p N}{v_1} \tag{4}$$

$$W = P_{suc} \dot{m} v_1 \frac{k}{k-1} \left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left(a_1 + \frac{a_2}{P_{dis}} + \frac{a_3}{P_{suc}} \right) + a_4 \tag{5}$$

Os dez pontos preenchidos na matriz de ensaio foram utilizados para alimentar o modelo proposto por Li (2012), conseguindo assim uma reprodução de toda a matriz de ensaios de maneira satisfatória, para regiões de interpolação e extrapolação fora das condições utilizadas no ajuste dos parâmetros. Os resultados apresentaram erros menores que 5% dos valores medidos quando comparados com os valores calculados. Pode ser visto nas figuras 12 e 13 um acordo admissível entre os valores

experimentais e os calculados, tanto para a vazão mássica quanto para potência consumida do compressor.

Figura 12: Resultados do modelo de Li (2012) para a vazão mássica.

Figura 13: Resultados do modelo de Li (2012) para a potência.

5 I CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma estrutura de controle automático para sistemas de refrigeração de alta pressão. O controle híbrido foi desenvolvido com um controle linear (controlador PI) seguido de um controle não linear (controle chaveado de

três níveis). Pôde-se perceber que o controle híbrido apresentou um desempenho e robustez satisfatórios trabalhando com ambas as válvulas simultaneamente, em ensaios reais de calorimetria. O desempenho da estrutura de controle foi avaliado por meio de testes de seguimento de referência e rejeição de perturbação, nos quais todos os requisitos de projeto do controlador foram cumpridos. Todos esses testes comprovaram que o conjunto controlador PI seguido do controle chaveado de três níveis é realmente eficaz para esse tipo de aplicação. Além de demostrar a agilidade esperada, a estrutura de controle desenvolvida aumentou a segurança do calorímetro, que trabalha com altas pressões. Dessa forma, o operador foi praticamente removido de uma situação repetitiva e de risco, operando o sistema apenas em algumas condições em modo semi-automático. Com a estrutura de controle desenvolvida, aplicada juntamente ao modelo físico proposto por Li (2012), é possível obter um modelo satisfatório do compressor em apenas um dia de ensaio, levando menos da metade do tempo do que na situação onde utilizava-se apenas o controle manual.

Este trabalho possibilita a abertura de novas pesquisas relacionadas ao controle de válvulas automáticas para calorímetros de CO_2, além de melhoramentos na estrutura física do mesmo. A primeira é considerar controles *feedfoward* para diminuir as perturbações causadas pelo acoplamento entre as pressões de sucção e de descarga. A segunda é a adição de uma estrutura com *anti-windup*, para reduzir a sobrecarga da ação integral do controlador PI. A terceira é a comparação entre o par controlador PI seguido do controle chaveado de três níveis, e controle PI com saída PWM. Por fim, realizar uma mudança na linha de pressão intermediária, adicionando mais um reservatório intermediário e uma válvula entre eles, conseguindo assim diminuir a diferença de pressão entre a descarga e a linha intermediária, e entre a sucção e a linha intermediária. Dessa forma, seria possível obter todas ou praticamente todas as combinações de pressões entre a descarga e a sucção com as válvulas automáticas.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado com financiamento da EMBRAPII, por meio da Unidade EMBRAPII POLO/UFSC. Os autores são gratos pelo suporte técnico do Professor Cláudio Melo (*in memoriam*).

REFERÊNCIAS

Åström, K. J., and Hägglund, T. (1995). ***PID controllers: theory, design, and tuning* (Vol. 2)**. Research Triangle Park, NC: Instrument society of America.

Belman-Flores, J. M., Barroso-Maldonado, J. M., Rodríguez-Muñoz, A. P., and Camacho-Vázquez, G. (2015). **Enhancements in domestic refrigeration, approaching a sustainable refrigerator – a**

review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *51*, 955-968.

Dangui, H. A. S., Flesch, R. C. C. e Schwederky, B. B. (2017). **Avaliação Experimental de Técnica de Controle Preditivo em bancada de testes de compressores herméticos para refrigeração.** Em: *13° Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Porto Alegre, RS, Brasil.

Frutuoso Junior, E. (2014). **Análise do desempenho de compressores herméticos de refrigeração para aplicações com dióxido de carbono.** Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC, Brasil.

Joffily, L. A. L. e Pimenta, J. M. D. (2006). **Avaliação de desempenho e simulação de compressores de refrigeração por meio de um ciclo superaquecido alternativo.** Em: *16° Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, Brasil.

Li, W. (2012). **Simplified steady-state modeling for hermetic compressors with focus on extrapolation.** *International journal of refrigeration*, *35*(6), 1722-1733.

Ogata, K. (2002). ***Modern Control Engineering***. Prentice Hall, NJ, USA, 4th edition.

Schwedersky, B. B., Flesch, R. C. C. and Dangui, H. A. S. (2018). **Practical Nonlinear Model Predictive Control with Hammerstein Model Applied to a Test Rig of Refrigeration Compressors.** In: *24th International Compressor Engineering Conference*. West Lafayette, USA.

Silveira, A. S., Machado, E., de Sá, S. R. L. and Gonçalves, J. M. (2014). **Design and construction of an innovative hot-gas cycle calorimeter for microcompressors.** In: *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Belém, PA, Brazil.

Silveira, A. S., Machado, E., and Knabben, F.T. (2015). **Design and construction of an automated hot-gas cycle calorimeter for carbon dioxide compressors.** In: *23rd International Congress of Mechanical Engineering*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

CAPÍTULO 10

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

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 26/11/2019

Matheus Silva Pestana
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/5711361444291978

Orlando Donato Rocha Filho
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/7455720877184126

Danúbia Soares Pires
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/4739495583287970

RESUMO: O presente artigo se caracteriza como uma abordagem de Sistemas Inteligentes dinâmicos de caráter não-lineares. Propõe-se através do uso de Redes Neurais Artificiais (*RNA*) a um sistema virtual de análise do padrão de potabilidade da água, para a implementação da proposta foram utilizados softwares de modelagem e simulação com o intuito de identificar e modelar um sistema do tipo caixa preta, utilizando os potencias das *RNA* de aprendizado e conhecimento para otimizar o processo de tratamento de água. Essa estratégia buscar oferecer um sistema auxiliar na tomada de decisão sobre o índice da qualidade da água que é realizado nas Estações de Tratamento de Água (ETA's) garantindo confiabilidade, robustez e eficiência acerca do produto final que será destinado à distribuição, evitando erros e subjetividades nas análises realizadas. Com o objetivo de realizar a validação da metodologia desenvolvida, os resultados experimentais demonstram que a proposta é bastante promissora, apresentando bom desempenho computacional e baixo tempo de resposta.

PALAVRAS-CHAVE: Redes Neurais Artificiais; Tratamento de Água; Sistemas Inteligentes; Inteligência Computacional; Reconhecimento de Padrão.

A NEW APPROACH TO A VIRTUAL WATER QUALITY IDENTIFYING SIMULATOR BASED ON INTELLIGENT SYSTEM METHODOLOGY INSERTED IN THE NEURAL NETWORK CONTEXT

ABSTRACT: This paper is characterized as a nonlinear dynamic intelligent systems approach. It is proposed through the use of Artificial Neural Networks (*ANN*) to a virtual system of analysis of the water potability standard. For the implementation of the proposal were used

modeling and simulation software in order to identify and model a box type system. Using the learning and knowledge ANN potencies to optimize the water treatment process. This strategy seeks to offer a system that assists in decision-making on the water quality index that is performed at Water Treatment Stations (*WTA*) ensuring reliability, robustness and efficiency about the final product that will be destined for distribution, avoiding errors and subjectivities. In the analyzes performed. In order to validate the developed methodology, the experimental results show that the proposal is very promising, presenting good computational performance and low response time.
KEYWORDS: Artificial Neural Networks, Water Treatment, Intelligent Systems, Computational Intelligence, Pattern Recognition

1 I INTRODUÇÃO

A qualidade da água é definida como a resultante de fenômenos naturais e da atuação humana, tal interferência modifica suas características iniciais, tornando-a própria para a sua utilização em diversas atividades cotidianas (SPERLING, 1994). A busca por processos de tratamento e análise de amostras cada vez mais puras, incentiva estudos de pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos a fim de assegurar de forma dinâmica e robusta resultados mais confiáveis acerca da água que consumimos. O padrão de potabilidade de água possui destaque em diversos ramos da sociedade, sendo para o consumo diário, nas agroindústrias e nos processos industriais. Em diversas aplicabilidades, buscasse por recursos hídricos que possuem um padrão de pureza, com o objetivo de garantir a qualidade de produtos e serviços oferecidos.

Necessita-se de ferramentas que possam avaliar a confiabilidade da água utilizada. A busca por uma metodologia eficiente, capaz de caracterizar a potabilidade da água após as etapas de realizadas nas Estações de Tratamento de Água – captação, coagulação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação – surge pelo alto grau de subjetividade e incerteza acerca do resultado final dos processos de purificação após as etapas de tratamento e distribuição para as áreas residenciais e industriais. O uso de uma plataforma de modelagem e simulação tem por objetivo realizar a interação homem e máquina de forma simples, auxiliando na tomada de decisão sobre o grau da qualidade da água após as etapas de tratamento baseados em valores pré-estabelecidos pelos órgãos de controle como o Ministério da Saúde e a Agencia Nacional de Águas. A análise de dados tem por objetivo prever um comportamento e de forma antecipada, informando ao operador para tomar a melhor decisão a fim reduzir o tempo de resposta, obter maior eficiência e garantir confiabilidade ao processo por inteiro. Nesse sentido, a metodologia proposta, oferece uma plataforma que busca utilizando os conceitos de Redes Neurais Artificiais (*RNA*) avaliar de forma continua e eficaz para auxiliar o operador a tomar decisões com

maior rapidez e segurança acerca da potabilidade da água, com uma modelagem que busca se aproximar ao máximo com o comportamento real.

As técnicas de Computação Inteligente, em especial as Redes Neurais Artificiais (*RNA*), se mostram promissoras para processos que necessitam de técnicas de identificação e modelagem de sistemas dinâmicos podem ser descritas em (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 1998), (CALDEIRA et al., 2007), (REZENDE, 2003), (WANG, 1997), pois possuíam características como aprendizagem, treinamento, validação e teste (Haykin, 2001). As *RNA* apresentam uma capacidade de reconhecimento de padrões, beneficiando processos de controle do tipo online, ou seja, quando o operador pode interferir de forma dinâmica (AGUIRRE, 2015), obedecendo os valores máximos permitidos pelos órgãos controladores.

2 I DEFINIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

O objetivo da Inteligência Artificial (IA) é o desenvolvimento de paradigmas ou algoritmos que requeiram máquinas para realizar tarefas cognitivas para as quais os humanos são altamente melhores (SAGE, 1990). Uma IA deve haver três capacidades essenciais: armazenar conhecimento, aplicar o conhecimento armazenado e adquirir novos conhecimentos através de experiência. A IA, em especial Rede Neural Artificial, utiliza representação simbólica do conhecimento subjetivo, ou seja, de forma linguística – regras, informações do especialista, especificações – para obter modelos lógicos que processam informação de forma qualitativa em computacional. Tais características de se mostram muito adequadas para a comunicação do tipo homem-máquina (COPPIN, 2010).

Para a problemática analisada os conceitos de Inteligência Artificial se mostram como uma metodologia que possui a capacidade de promover de forma objetiva soluções dinâmicas para sistemas não lineares como podemos observar em (BOND; GASSER, 1998), (COPPIN, 2010), (RUSSEL; NORVING, 2013). Buscando novas técnicas com o objetivo de desenvolver novas ferramentas que auxiliem durante o processo de tratamento de água, reduzindo erros durante a tomada de decisões sobre a qualidade dos recursos hídricos a serem destinados aos consumidores, esta preocupação é evidenciada em (DELGADO, 2017), (SAAB, 2017), (WANG et al., 2017).

O modelo proposto, possibilita transformar graus de subjetividade no padrão de potabilidade de água em informação quantitativa. Oferecendo a um sistema de análise e previsão baseados em Redes Neurais Artificias afim de auxiliar na caracterização do índice de qualidade de água otimizando o processo decisório e modelagem de sistemas do tipo não linear.

3 I FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Qualidade da água

A água é um dos recursos essenciais para a manutenção da vida no planeta. Através da água a sociedade moderna se desenvolveu como conhecemos hoje, auxiliando na fixação de grupos de pessoas próximas a rios e lagos. Atualmente buscasse cada vez mais por fontes hídricas para abastecer as cidades com altos graus de processos de tratamento dessa água pela poluição e contaminação nas zonas de captação em afluentes e rios.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através das resoluções 410 de 2009 e 430 de 2011, padrões de qualidade e parâmetros em limites aceitáveis de substancias com o objetivo de promover saúde as pessoas. O estudo busca garantir que os padrões sejam respeitados e auxiliando a avaliar a influência da interferência humana no resultado final do processo de captação, tratamento e distribuição pelas Estações de Tratamento de Água – ETAs.

Fundamentado pela Índice de Qualidade de Águas do Ministério da Saúde (ANA, 2003), a água para ser considerada potável deve estar em conforme com o padrão microbiológico de padrões preestabelecidos de valor máximo permitido pelos órgãos regulamentadores competentes a fim de garantir a promoção, proteção e recuperação da saúde. Os parâmetros que são utilizados na elaboração deste estudo se baseia nos valores de Valores Máximos Permitidos (*VMP*) que são estabelecidos pela Agencia Nacional de Águas em conjunto com o Ministério da Saúde, tais valores foram determinados via métodos de análise, com o intuito de oferecer aos consumidores um padrão de potabilidade da água destinada à população posterior ao processo de tratamento da água. Baseado nesses *VMP*, utilizamos os dados reais para realizar as simulações computacionais.

Nesse sentido, a busca por uma ferramenta que seja uma alternativa para auxiliar na tomada de decisão acerca dos níveis de potabilidade, otimizando os processos de análise, podendo graduar o índice da qualidade da água capaz de evitar erros e subjetividade no serviço de tratamento nas ETAs.

3.2 Redes neurais artificiais

Segundo Haykin (2001), uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Elas possuem capacidades de organizar dados de forma estrutural de forma similar ao cérebro humano, de forma a realizar certos processamentos como reconhecimento de padrões, tais estruturas são conhecidas como neurônios.

As estruturas de neuronais se assemelham ao cérebro humano nos aspectos

de aprendizagem, uma vez que, o conhecimento é adquirido pela rede a partir do ambiente em que é inserido e na força de conexão entre os neurônios, denominadas como pesos sinápticos, onde o conhecimento adquirido é armazenado. O modelo não linear de um neurônio é matematicamente representado por (1) e (2) (HAYKIN, 2001).

$$u_k = \sum_{m=1}^{m} w_{kj} x_j \tag{1}$$

$$y_k = \emptyset(u_k + b_k) \tag{2}$$

onde:

u_k é resposta para o k-ésimo neurônio;

m é o número de sinais de entrada do neurônio;

w_k é o pesos sináptico associado ao k-ésimo neurônio;

x_j é o j-ésimo sinal de entrada do neurônio;

b_k é o bias ou limiar de cada neurônio;

y_k é o sinal de saída do k-ésimo neurônio;

$\emptyset$ é a função de ativação do k-ésimo neurônio.

O bias pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo do sistema proposto, podemos modelar a saída alterando o bias. O seu uso tem o objetivo de aplicar uma transformação afim à saída u_k e alterar o campo local induzido como demostrado em (3).

$$v_k = (u_k + b_k) \tag{3}$$

onde v_k representa o campo local induzido ou potencial de ativação para o neurônio k. O modelo neuronal pode ser expresso em blocos conforme a representação abaixo. Ver Figura 1.

Figura 1 - Modelo não-linear de um neurônio.

Fonte: Autor.

Podemos identificar a partir do modelo neuronal, um conjunto de sinapses ou elos de conexão, individualmente qualificado pelo seu peso sináptico ou força própria, um elemento somador de sinais de entrada ponderados pelos pesos sinápticos do neurônio e uma função de ativação cuja função é restringir a amplitude da saída, tipicamente escrita em um intervalo unitário fechado [0, 1]. A propriedade fundamental de uma rede neural é a sua capacidade de aprendizagem, definida como o processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente no qual está inserida. O tipo de aprendizagem é determinado pela maneira pela qual a modificação dos parâmetros ocorre (HAYKIN, 2001). Através da estimulação do ambiente, a rede é estimulada a realizar a modificações nos parâmetros e obter novas respostas aos sinais de entrada, sendo baseada na memória do processo.

As *RNA* utilizam camadas de neurônios matemáticos que processam sinais de dados adquiridos do meio, essa informação é passada pelas demais camadas por meio de retro propagação e oferecendo uma saída de resposta a sua incitação inicial.

Quando trabalhamos com sistemas que utilizam as *RNA*, obtemos ferramenta poderosas capazes de receber, modelar e distribuir de maneira organizada diversas informações que são armazenadas e compartilhadas pela sua unidade de processamento. Durante o processo de aprendizagem, os pesos das conexões entre as respostas ao estimulo inicial são ajustados, proporcionando uma flexibilidade a modelagem de informação apresentada, distribuídas por meio da rede. A manipulação dessas informações por meio de interações nas unidades de processamento produzindo saídas.

O treinamento é supervisionado quando o ajuste dos parâmetros é feito com base na apresentação de um conjunto de pares de entrada e saídas padrão, nesse processo, uma entrada padrão é apresentada à rede e uma saída é calculada. O dimensionamento de uma rede neural depende de fatores como a quantidade de camadas e de neurônios que ela deve possuir, esses ajustes devem ser previamente definidos pelo especialista, uma vez que, o número de camadas e a quantidade de neurônios por camada é conhecido. As camadas intermediárias estão diretamente relacionadas a eficiência do treinamento, na qual o número de neurônios que a ela pertencem são determinantes para o seu funcionamento correto na solução de problemas. É proposto via o estudo, uma metodologia que relaciona as características de aprendizagem e treinamento das redes neurais para modelar um sistema capaz de reconhecer o padrão de potabilidade e auxiliar o operador a obter uma ferramenta confiável para tomada decisória acerca do resultado final do processo de tratamento de água.

3.3 Identificação de sistemas

Identificação de Sistemas são definidos como uma área de modelagem matemática que estuda técnicas alternativas para descrever sistemas do tipo caixa branca, ou seja, quando é necessário o conhecimento das leis físicas que influenciam o seu funcionamento. No entanto, nem todos os sistemas analisados são conhecidos o seu comportamento conceitual pela física ou natureza, os estudos de modelagem e identificação quando se conhece o processo de atuação de forma parcial ou desconhece as características do sistema em questão, podemos analisa-lo com a abordagem do tipo caixa preta (AGUIRRE, 2015).

Para sistemas não lineares como as Redes Neurais Artificiais, a modelagem do tipo caixa preta é aplicada, pois os neurônios utilizados fazem a ponderação dos pesos sinápticos e o operador necessita apenas inserir os dados de entrada e saída do sistema, cabendo a ele determinar apenas a estrutura ou arquitetura de rede, o número de camadas, conexões necessárias e que dados irão ser utilizados no processo de aprendizagem e treinamento da *RNA*.

O estudo de identificação de sistemas decorre da ausência de informações previas do sistema de análise, seja por limitações de conhecimento, tempo, recursos para a estimação de parâmetros necessários para entendimento do conjunto de dados apurados. Nesse sentido, o uso das técnicas se mostraram essenciais para o desenvolvimento do presente projeto.

4 I METODOLOGIA

O funcionamento da Rede Neural Artificial proposta para o estudo do padrão de potabilidade da água baseia-se no seguinte processo. A água em seu estado inicial é conduzida as Estações de Tratamento, nas quais os processos físicos e químicos são realizados como captação, coagulação ou floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação, após essa etapa, ou seja, na fase de análise final da água antes de ser destinada ao consumidor, onde são realizadas as verificações dos *VMP* via analise químico-física, a metodologia proposta é inserida, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão acerca do padrão da qualidade da água analisada pelos laboratórios especializados (ANA, 2003).

O estudo contempla o desenvolvimento de uma ferramenta auxiliar, que irá atuar após a fase de tratamento, uma vez que, o interesse dos autores é oferecer uma metodologia de análise, cujo intuito é buscar a uniformidade do resultado final de tratamento, com uma metodologia a ser aplicada no processo final dos processos realizados pelas ETAs, respeitando os *VMP* estabelecidos pela Agencia Nacional de Águas – ANA.

Por meio do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), a ANA por meio do Índice de Segurança Hídrica assegurar a analise integrada para solucionar os riscos de contaminação, preservação das propriedades originais e promover o respeito ao padrão de qualidade da água. A *RNA* irá graduar por meio de um Índice de Potabilidade se os valores de padrões microbiológicos estão de conforme com os predeterminados pelos órgãos de controle regulamentados por lei (ANA, 2019). Caso a amostra verificada estar em conformidade com o texto que regulamenta o padrão hídrico aceitável, ela poderá ser encaminha à distribuição, caso contrário, esta amostra será conduzida a fase de tratamento, com intuito de corrigir algum erro que ela possua. Ver Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.

Fonte: arquivo pessoal.

5 I RESULTADOS COMPUTACIONAIS

No desenvolvimento da Rede Neural Artificial foram utilizadas as arquiteturas de rede Cascade forward e Feedforward. Quando tratamos dados com valores muito próximos um do outro, o primeiro tipo de arquitetura de rede se mostra mais adequada, pois no seu processo de iteração, ela padroniza todas as entradas para uma matriz de dados de mesma ordem, proporcionando uma maior uniformidade nos dados e com isso oferendo uma medida de regressão linear melhor distribuída e facilitando o seu entendimento. A arquitetura do tipo Feedforward se torna mais aplicável após o tratamento inicial dos dados obtidos da rede do tipo Cascede forward, uma vez que, após a matriz e os pesos sinápticos estarem uniformizados, as iterações feitas pela Rede Neural se mostram mais eficientes para a análise, reduzindo erros e ruídos no processo de ponderação dos sinais de entrada e saída do sistema.

Utilizou-se os dados tabelados coletados da Agencia Nacional de Águas onde os parâmetros estão descritos e quantificados, esses dados foram modelados através de uma *RNA* com arquitetura Cascade forward com duas camadas, sendo a primaria com 24 neurônios definidos pelo operador com 1000 ephocs durante o seu treinamento e validação dos dados e a segunda camada com dois neurônios, cujo o intuito é a validação dos dados da camada anterior. A *RNA* apresentou uma característica de associação de padrão e oferecendo uma análise confiável para o estudo uma vez que a segunda camada é responsável pela caracterização da saída do sistema, podendo ser própria ou impropria ao consumo.

A metodologia se deu pela seguinte forma, os dados extraídos da Índice de Qualidade de Águas do Ministério da Saúde foram analisados criticamente, definido o seu comportamento e identificados os parâmetros decisórios para o funcionamento da rede. Os valores dos parâmetros são mostrados na Tabela 1.

	Mínimo	**Máximo**
Temperatura	5° C	30° C
Turbidez	0 μT	0,5 μT
pH	1	14

Tabela 1 - Parâmetros de entrada da simulação.

Fonte: ANA - Agencia Nacional de Águas.

Os valores dos sinais de entrada correspondem aos valores delimitados entre os valores máximos e mínimos. A saída do sistema corresponde à média das dos valores de entrada. Como mostrados na Tabela 2.

	Mínimo	**Máximo**
Temperatura	20° C	30° C
Turbidez	0 μT	0,15 μT

pH	5,9	7,5

Tabela 2 – Parâmetros de saída da simulação.

Fonte: elaboração própria.

Embasado pelo Plano Nacional da Segurança Hídrica (ANA, 2019), com diretrizes que buscam por meio de estudos, planos e projetos assegurar reduzir os riscos de exposição e vulnerabilidade a contaminação por materiais nocivos ao consumo humano, causadores de doenças, como é o caso dos particulados abrangidos pela análise da turbidez. Para o consumo humano, o Potencial de Hidrogênio (pH) assim como a temperatura dever ser normatizado, respeitando o padrão considerado próprio para sua utilização em seus diversos fins. A escolha por esses parâmetros de analise deu-se pela sua disponibilidade do mercado de encontrarmos sensores industriais capazes de realizar essas leituras com o intuito de realizar prototipagem.

Definidos as entradas e saídas, os vetores de pesos foram ajustados e obtido as seguintes regressões lineares, medidas que tomamos como variável para a análise das simulações obtidas, as figuras a seguir demonstram o comportamento entre as entradas e saídas, referidas com targets, a princípio analisadas de forma individualmente com o intuito de verificar o comportamento computacional das entradas e saídas. Ver Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 – Regressão linear do parâmetro pH.

Fonte: arquivo pessoal.

Figura 4 - Regressão linear do parâmetro Temperatura.

Fonte: arquivo pessoal.

Figura 5 - Regressão linear do parâmetro Turbidez.

Fonte: arquivo pessoal.

Observa-se que no sistema estudado, para os dados colhidos pela Índice de Qualidade de Águas, os comportamentos dos parâmetros individuais se mostraram linearmente modelados e apresentando índices de performance consideráveis eficientes e confiáveis com índice de performance da rede de 0,88 utilizando 1000 iterações, representando um erro aceitável de aproximadamente 0,1 para sistemas de engenharia. Os valores da regressão linear relacionam os dados do vetor de entrada com os do vetor de *target*, a *RNA* utiliza estes dados para a fazer as iterações matemáticas e oferecer uma saída ao estimulo de entrada. Quando os valores obtidos se aproximam de valores iguais a 1, as regressões lineares que mais se aproximam, mostram-se mais relevantes e melhores ponderados de acordo com a aprendizagem e treinamento da *RNA*. A arquitetura *Cascade forward* apresenta como vantagem a normatização dos vetores de entrada e de saída, que serão transformados em matrizes para então serem apresentados para a rede neural com todas as entradas e as saídas de igual ordem de elementos.

Após a verificação individual dos parâmetros, podemos avaliar seu comportamento em conjunto, observação suas características e particularidades, foi-se então desenvolvido uma *RNA* com três entradas e duas saídas, ou seja, um sistema MIMO – multiples inputs and multiples outputs – que contém duas camadas de processamento neuronal, a primeira com 24 neurônios e a segunda com 2 neurônios. A primeira camada tem por objetivo realizar o aprendizado e treinamento, necessitando de um número maior de neurônios, a segunda, é encarregada de realizar a validação dos dados da camada anterior, necessitando de um número menor de neurônios para tal função. Podemos analisar o resultado da simulação realizada, ver Figura 6.

Figura 6 – Rede neural com os parâmetros analisados em conjunto.

Fonte: arquivo pessoal.

A escolha das variáveis deu-se em recorrência de estudos acerca da disponibilidade de sensores e equipamentos a serem utilizados na indústria para sua implementação. Estes podem ser facilmente instalados e operados, garantindo confiabilidade aos processos de tratamento e analise da qualidade da água, os índices de performance e garantem a verossimilhança do comportamento das variáveis utilizados aplicado a modelagem caixa preta do sistema de analise virtual da qualidade de água após as etapas de tratamento.

Observamos que os resultados da regressão linear para a proposta se apresentam como uma metodologia eficiente, uma vez que, os dados obtidos na simulação demonstram a eficiência para a modelagem de sistemas do tipo não linear, oferecendo confiabilidade e robustez ao sistema de análise do tratamento da água.

6 I CONCLUSÃO

O presente estudo se apresenta como uma metodologia que busca uma ferramenta que auxilie na tomada de decisão acerca da análise do padrão de potabilidade da água após o tratamento realizados nas Estações de Tratamento de Água. O uso da ferramenta computacional para a maior interação homem-máquina se configura uma mudança nos paradigmas de sistemas de análise e previsão para a área de controle.

Os dados obtidos via simulação virtual indicam a precisão e convergência dos sinais de entrada e resposta do sistema. Os algoritmos desenvolvidos se mostram eficazes no agrupamento de padrões durante os processos de aprendizagem, treinamento e validação. Os testes das simulações mostram a eficiência das Redes Neurais Artificiais para tratar dados de forma dinâmica, para sistemas do tipo on-

line, quando o operador pode atuar diretamente na alteração de parâmetros. A abordagem utilizada se mostra bastante promissora para a problemática estudada para o reconhecimento de padrão da qualidade da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Monte Castelo e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) pelo apoio financeiro e fomento para este presente estudo.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luís Antônio. **Introdução à identificação de Sistemas.** Minas Gerais: Editora UFMG, 2013.

ANA, Agencia Nacional de Águas -. **Indicadores de Qualidade:** Indícios de Qualidade de Água. Brasília: Ministério da Saúde, 2013.

ANA, Agencia Nacional de Águas -. **Plano Nacional de Segurança Hídrica.** Brasília: Ministério da Saúde, 2019.

BOND, Alan; GASSER, Les. **Reading in Distributed Artificial.** Eua: Morgan Kaufmann Pub., 1998.

BRAGA, A P; CARVALHO, A P L F; LUDERMIR, T B. **Redes Neurais Artificiais:** Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro: Ltc, 1998.

COPPIN, Ben. **Inteligência Artificial.** Rio de Janeiro: Ltc, 2010.

HAYKIN, Simon. **Redes Neurais:** Princípios e prática. Porto Alegre: Bookman, 2010.

A O JUNIOR, H et al. **Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em MATLAB.** São Paulo: Thomson Learning Edições Ltda, 2007.

REZENDE, Solange Oliveira. **Sistemas Inteligentes:** Fundamentos e Aplicações. Barueri: Manole, 2003.

RUSSEL, S; NORVIG, P. **Inteligência Artificial.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2013.

SAGE, A P. **Concise Encyclopedia of Information Processing in Systems and Organization.** UK: Elsevier Science And Technology Books, 1990.

SPERLING, M. **Indicação do estado trófico de lagos e reservatórios tropicais.** Rio de Janeiro: Revista Bio, 2017.

WANG, L X. **A course in fuzzy systems and control.** Eua: Prentice Hall, 1997.

WANG, Yuanyuan et al. **Water quality prediction method based on LSTM neural network.** Nanjing, China: IEEE, 2017.

CAPÍTULO 11

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

Data de aceite: 17/03/2020

Vlademir 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 I 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 I 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 servo-potenciômetro 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 imã 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 I 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.

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

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

$$e[n] = \hat{x}[n] - x[n] \tag{2}$$

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,

$$-\frac{\Delta}{2} < e[n] < \frac{\Delta}{2} \tag{3}$$

sendo Δ a resolução do quantizador calculado por,

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

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®.

$$Q(x) = \begin{cases} 0, & se \left\lfloor \frac{x}{q} \right\rfloor < 1 \\ \left\lfloor \frac{x}{q} \right\rfloor . q, & caso\ contrário \end{cases} \tag{5}$$

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 I 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:

$$T = 5{,}5.(t_2 - t_1) \tag{6}$$

$$L = 2{,}8t_1 - 1{,}8t_2 \tag{7}$$

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.

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

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 I 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).

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

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,

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

onde:

$$a = K_p \tag{11}$$

$$b = K_p \frac{T_S}{T_i} \tag{12}$$

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 HÅGGLUND, 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,

$$K_p = 0{,}3750,$$

$$T_i = 1{,}5239 \tag{13}$$

6 I 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 I 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 Tunning. 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 actuador under the influence of stiction. Control Eng. Pratice, 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 Temperaruta Control of Power Stations. International Conference on Computer and Automation Engineering, p. 159-156, 2009.

CAPÍTULO 12

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

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 25/11/2019

Edilberto Pereira Teixeira
Universidade de Uberaba – Departamento de Engenharia de Computação
Uberaba – MG
lattes.cnpq.br/8601887472791662

Luciano Rangel Pinheiro Neto
Universidade de Uberaba – Departamento de Engenharia de Computação
Uberaba – MG
lattes.cnpq.br/0092005493037053

RESUMO: Com a evolução da capacidade computacional dos modernos controladores lógicos programáveis, tornou-se possível a implementação de estratégias avançadas de controle que tradicionalmente são realizadas em sistemas digitais de controle distribuído. Desta forma, os controladores lógicos programáveis estão cada vez mais competitivos na área de controle avançado de processos. De forma geral, este trabalho apresenta a criação de um ambiente de simulação de controle avançado de processos por meio de uma rotina de controle no *software* RSLogix5000®, com a utilização da ferramenta FuzzyDesigner® para a criação do controlador do tipo *Fuzzy*. Utilizou-se o *software* Matlab® como suporte para o cálculo de parâmetros do controlador e o *software* PlantTriage® para identificação da função de transferência do processo. Neste trabalho, foi simulado o controle de vazão de embebição utilizando-se um controlador *Fuzzy* cuja topologia tem-se como entradas o erro e a derivada do erro. Foi adotado o controlador SoftLogix5860®, no entanto, os conceitos que serão utilizados são aplicáveis à maioria dos controladores programáveis comuns. A planta do processo foi simulada no próprio CLP e o sistema opera de forma integrada com um supervisório desenvolvido através do *software* FactoryTalk®. Com o término do trabalho foi obtido como resultado uma rotina em ladder no CLP capaz de simular sistemas industriais a partir de modelos matemáticos, gerando gráficos de forma intuitiva permitindo que estratégias de controle sejam previamente testadas nas indústrias pelo engenheiro de automação, em um ambiente de simulação, antes de serem implantadas no processo industrial. Além disso, foi feito um *how-to* de utilização de ferramentas com o foco na criação de rotinas de controle inteligente, em alternativa ao controle tradicional PID, e foi possível se concluir a simplicidade de uso da ferramenta FuzzyDesigner® mesmo se considerando a complexidade do assunto que é a lógica Fuzzy.

PALAVRAS-CHAVE: *Ladder*, Supervisório, Controlador *Fuzzy*, Lógica *Fuzzy*, Controle de

Processos.

CREATING AN ADVANCED PROCESS CONTROL SIMULATION ENVIRONMENT IN A SUGAR-ENERGY PLANT

ABSTRACT: With the evolution of the computational capacity of modern programmable logic controllers, it has become possible to implement advanced control strategies that are traditionally performed in digital distributed control systems. In this way, programmable logic controllers are increasingly competitive in the area of advanced process control. In general, this work presents the creation of an advanced process control simulation environment by means of a control routine in RSLogix5000® software, using the FuzzyDesigner® tool to create the Fuzzy type controller. Matlab® software was used as support for calculating controller parameters and the PlantTriage® software for process transfer function identification. In this work, the control of imbibition flow was simulated using a Fuzzy controller whose topology has as inputs the error and the derivative of the error. The SoftLogix5860® controller has been adopted, however, the concepts that will be used are applicable to most common programmable controllers. The process plant was simulated in the CLP itself and the system operates in an integrated way with a supervisor developed through FactoryTalk® software. With the end of the work a ladder routine in the CLP was able to simulate industrial systems from mathematical models, generating graphs in an intuitive way allowing control strategies to be previously tested in the industries by the automation engineer, in an environment of simulation, before being implanted in the industrial process. In addition, a tool-based how-to was developed with a focus on creating intelligent control routines as an alternative to the traditional PID control, and it was possible to conclude the simplicity of using the FuzzyDesigner® tool even if considering the complexity of the which is Fuzzy logic.
KEYWORDS: Ladder. Supervisory, Fuzzy controller. Fuzzy Logic. Process Control.

1 I INTRODUÇÃO

A competição global e a pressão dos acionistas fazem com que a indústria tenha que superar metas. Para permitir a continuidade da empresa no mercado que exige rápidas mudanças, as indústrias têm focado muito em melhoria contínua, em aumento da eficiência operacional, redução de custos, aumento da qualidade do seu produto final e investimento em projetos de otimização do seu processo industrial. As linhas de processo de uma planta devem estar continuamente em melhoria, mantendo a sustentabilidade dos negócios.

O sistema de controle de processo automatiza ambos, rotinas e condições anormais de operação, e auxilia a operação a manter o controle de seu processo. O desempenho do processo, e, portanto, os resultados dos negócios aumentam por meio de operações aplicadas e conhecimento do processo, via sistemas de controle

de processos. Infelizmente, muitos estudos nas indústrias têm mostrado que grande parte das malhas de controle não operam em modo normal, sofrem oscilação e aumentam a variabilidade do processo, reduzindo a eficiência da planta.

O impacto direto no desempenho do processo é significativo, podendo citar: perda de produção, problemas de qualidade, consumo excessivo de energia, incidentes com segurança e meio ambiente, paradas não planejadas e alto custo de manutenção. Neste contexto, todas as camadas da pirâmide de automação devem ser tratadas.

Figura 1 - Pirâmide de automação.

Na Figura 1, a base da pirâmide de automação são os instrumentos que devem estar calibrados e com alta confiabilidade. Já na camada acima os PIDs devem estar bem sintonizados e com estratégias de controle bem definidas para cada aplicação industrial. Porém, nesta camada de controle regulatório o cenário que encontra-se na prática é ruin, com controladores abaixo do desempenho e estratégias de controle inapropriadas.

Segundo Fonseca (2004), uma malha de controle com desempenho ruim implica em perda de energia, qualidade e produção, já uma malha de controle com bom desempenho permite aumentar a qualidade e produtividade no processo.

A grande parte dos processos industriais utiliza o controle do tipo PID. A simplicidade aliada à eficiência encontrada neste tipo de controle é o principal motivo dele estar implementado em grande parte dos controladores industriais. Em Rubaai et al. (2008) é citado que 96% dos controladores industriais são do tipo PID.

Entretanto, alguns sistemas são, muitas vezes, intratáveis pelos métodos convencionais de controle. Incluem-se, nessa classe, sistemas com:

- Características não lineares,
- Grandes atrasos de transporte,

- Equações variantes no tempo,
- Múltiplas entradas e múltiplas saídas,
- Equações difíceis de serem estimadas,
- Perturbações não modeladas,
- Equações conhecidas, porém muito complexas,
- Sistemas com amplas faixas de operação.

Em algumas aplicações mais complexas todos esses itens podem estar presentes de forma relevante em uma só planta industrial. Sendo assim, o fato de muitos sistemas possuírem características que inviabilizam ou dificultam ação de controles mais simples, o que torna necessário a utilização de alternativas como o controle *fuzzy* para se operar o processo com maior eficiência e menor variabilidade conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Alta variabilidade com controle tradicional versus baixa variabilidade com controle avançado.

Conforme mostrado na Figura 3, as indústrias podem obter uma redução na variabilidade por meio da sintonia dos parâmetros PID das malhas de controle. A utilização de sistemas de otimização em tempo real que escrevem os Set-Points ótimos eleva o processo à um outro patamar com menor variação das variáveis de processo e atuação mais próximo ao limite operacional. Porém, a proposta do controle avançado deste trabalho é uma oportunidade de aumentar ainda mais o desempenho industrial, substituindo o controle tradicional que atua em uma variável e é baseado no erro, por um controle avançado multivariável que incorpora e antecipa distúrbios de processo. Com a combinação dessas técnicas, as variáveis de processo ficarão com variabilidade muito pequena e as malhas de controle poderão ser setadas para atuarem bem próximas ao limite operacional. É neste contexto que entra o controle avançado de processos utilizando a lógica *fuzzy*.

Figura 3 - Combinação de diferentes técnicas de controle obtendo o desempenho ótimo.

Considerando o desafio das indústrias de diminuir a variabilidade do processo e a necessidade de implantar controle avançado, e com a evolução da capacidade computacional, os CLPs estão cada vez mais competitivos tornando possível a implementação de estratégias avançadas de controle. E levando-se em consideração que há uma lacuna de sistemas de simulação de controle avançado que propiciem um ambiente amigável aos técnicos e engenheiros de controle nas indústrias. Este trabalho tem como objetivo primário a criação de um guia ou passo-a-passo de como se utilizar o *software* FuzzyDesigner® e de como integrar o controlador criado nesta ferramenta no RSLogix5000®. Adotou-se o controlador SoftLogix5860, no entanto, os conceitos que serão utilizados são aplicáveis à maioria dos controladores lógicos programáveis comuns. O sistema proposto neste trabalho viabilizará tanto a simulação de processo de vazão de embebição, como a implantação de estratégias de controle inteligente nos controladores lógicos programáveis. Tal sistema permitirá que estratégias de controle sejam previamente testadas nas indústrias, em um ambiente de simulação, antes de serem implantadas no processo industrial.

O foco em buscar aumento da eficiência industrial motivou a parceria empresa-universidade sem a qual este trabalho não seria possível. O autor deste trabalho é colaborador no grupo Tereos e possui acesso aos dados de sistema de supervisão, laboratório e aos equipamentos industriais.

2 I FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO PROCESSO

Uma importante operação unitária na usina é a extração do caldo da cana-de-açúcar que é realizado pelas moendas ou por difusores. Este processo consiste em separar o máximo possível de caldo da cana-de-açúcar. É importante que o controle

desta área esteja otimizado para extrair o máximo possível de caldo o que significa aumento de produtividade para a unidade industrial. Na extração do caldo da cana-de-açúcar, um dos controles de processo é conhecido como controle de vazão de embebição que tem como objetivo medir e controlar a vazão de água utilizada para a lavagem e "amolecimento" da cana-de-açúcar.

Segundo Manella (2012), o processo no qual a água ou caldo é aplicado ao bagaço que sai dos ternos das moendas, a fim de aumentar a extração de sacarose de um conjunto de moendas.

Utilizou-se para identificação do modelo do processo a funcionalidade *AMCT* (*Automatic Model Capture Technology*) do *software* PlantTriage®. O *AMCT* funciona em real-time procurando e reportando modelos de processos por meio da avaliação automática de todos os testes de resposta que ocorrem na malha de controle, tais como: mudanças de *set point*, rampas ou movimentos de válvula no modo manual. Ele filtra os dados e procura locais em que a variável de processo (PV) e a variável manipulada (MV) estejam estáveis, sofrem alteração e em seguida retornam novamente para o regime de estabilidade. Dessa forma, se o operador realizar uma mudança de *set point* ou movimentar a válvula em manual, o *AMCT* irá avaliar os dados, desenvolver e validar o modelo. Para validar o modelo, os dados devem ser suaves, dentro do ruído normal de processo. A Figura 4 mostra os dez últimos modelos encontrados.

		Start	P	I	D	F	Quality	Gain	DT	Lag1	Lag2	Intg	Stability	RRT	Notes
								%/%	sec	sec	sec			sec	
✓	AMCT	03/10/2018 23:41	0,37	13	0	0	4	0,34	25,2	0	0	False	1,7	96	
✓	AMCT	03/10/2018 18:58	0,39	50	0	0	2	0,37	27,3	0	0	False	6,1	100	
✓	AMCT	03/10/2018 14:15	0,6	30	0	0	2	2,2	2	0	0	False	2,4	43	
✓	AMCT	03/10/2018 13:14	0,13	3,6	0	0	3	1,4	4	0	0	False	1,3	16	
✓	AMCT	03/10/2018 11:07	0,16	9,9	0	0	3	1,3	11	5,2	0	False	3	69	
✓	AMCT	03/10/2018 10:44	0,043	39	0	0	2	3,5	70	0	0	False	43	200	
✓	AMCT	02/10/2018 23:31	0,092	5,9	0	0	4	1,8	7	2,7	0	False	3,1	40	
✓	AMCT	02/10/2018 21:51	0,43	6,3	0	0	1	0,58	6	3,8	0	False	0,7	43	
✓	AMCT	02/10/2018 02:25	0,52	4,8	0	0	2	0,27	10	0	0	False	0,44	27	

Figura 4 - Modelos identificados pelo AMCT do PlantTriage.

A coluna "*Quality*" indica a qualidade do modelo que é um número entre 1 e 7. Sendo que 1 é uma qualidade excelente e 7 uma qualidade muito baixa. Para este estudo escolheu-se a penúltima linha por ser um modelo de qualidade excelente. Ao clicar neste modelo, é mostrada a Figura 5, onde temos a janela de tempo onde o *AMCT* encontrou uma oportunidade de detecção do modelo.

Figura 5 - (a) Janela de tempo para identificação do modelo (b) Modelo identificado.

Sendo assim, o modelo do processo, P(s) é conhecido.

$$P(s) = \frac{0{,}58 \cdot e^{-6s}}{3{,}8s+1} \tag{1}$$

Como o CLP trabalha de maneira digital, procedeu-se a modelagem matemática para determinar a função de transferência de dados amostrados, G(z), considerando que o período de amostragem, T, seja 0,5s. Utilizou-se o *software* MATLAB para cálculo.

```
'MODELAGEM MATEMÁTICA'              %Exibe o título
T = 0.5;                            %Define o período de amostragem.
numeradorS=0.58                     %Define o numerador de G1(s)
denominadorS=[3.8 1]                %Define o denominador de G1(s)
'G1(s)'                             %Exibe o título
G1=tf(numeradorS,denominadorS)      %Cria G1(s) e exibe
G=c2dm(G1,T,'zoh')                  %G1(z) e exibe na tela
```

```
G =

   0.07151
  ----------
  z - 0.8767

Sample time: 0.5 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Considerando que o período de amostragem, T, seja 0,5s e por definição $z = e^{st}$, então $e^{-6s} = z^{-12}$. Dessa forma, o novo G(z) é descrito pela Equação 2.

$$G'(z) = \frac{0{,}07151 \cdot z^{-12}}{(z-0{,}8767)} \tag{2}$$

Segundo GARANITO, 2006, sistemas dinâmicos são todos os sistemas que evoluem no tempo, qualquer que seja a sua natureza, isto é, sistemas físicos, biológicos, químicos, sociais, econômicos, etc. Esta evolução pode ser descrita (modelada) por equações de diferenças, uma vez que esse tempo é muitas vezes medido em intervalos discretos.

Para simular o processo no CLP foi necessário encontrar a equação de diferença da função do processo vazão de embebição. Sendo a FT do processo representada pela Equação 3.

$$G(z) = \frac{0{,}07151}{(z-0{,}8767)} \tag{3}$$

Para obter a equação de diferença:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{F(z)} = \frac{0{,}07151}{(z-0{,}8767)} = \frac{0{,}07151.z^{-1}}{1-0{,}8767.z^{-1}} \tag{4}$$

$$\mathrm{Y(z)}.[1 - 0{,}8767 \cdot z^{-1}] = F(z) \cdot [0{,}07151 \cdot z^{-1}] \tag{5}$$

$$Y(z) = 0{,}8767 \cdot z^{-1} \cdot Y(z) + 0{,}07151 \cdot z^{-1} \cdot F(z) \tag{6}$$

Na forma de equação de diferença:

$$y[n] = 0{,}8767 \cdot y[n-1] + 0{,}07151 \cdot f[n-1] \tag{7}$$

3 I RESULTADOS

Foi simulado o controlador *fuzzy* usando-se o *toolbox* Simulink do *software* Matlab. Realizou-se o posicionamento dos blocos de forma a simular e comparar a malha de realimentação negativa com controlador *fuzzy*, malha com controlador PID e malha aberta. O diagrama de blocos está ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de bloco de uma planta de vazão de embebição controlada por um controlador fuzzy, controlador PID e em malha aberta.

Observe que o ganho na malha do controlador *fuzzy* tem o efeito de uma ação proporcional dependente. Alterando-se o seu valor, varia-se a velocidade de atuação do controlador *fuzzy*. Observa-se também que como a função de transferência da planta não possui um integrador intrínseco, há a necessidade de incluir um integrador em série na malha direta. A resposta da simulação está representada na Figura 7.

Figura 7 - Resposta da malha de controle.

A rotina do CLP com o controlador Fuzzy foi implementada em linguagem *ladder*. A Figura 8 representa uma imagem principal da rotina.

Figura 8 - Rotina no CLP.

A confecção de tela foi desenvolvida por meio do *software* Factory Talk View Studio® cuja aplicação é voltada à criação de telas gráficas de interação com controladores lógicos programáveis tendo como função proporcionar uma visão mais

geral e intuitiva do processo. A tela pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Rotina implementada no CLP.

4 I CONSLUSÕES

Foi possível desenvolver a proposta deste trabalho que era viabilizar a criação de um ambiente de simulação de controle inteligente de processos por meio da implementação de uma rotina de controle *fuzzy* em linguagem *ladder* no *software* RSLogix 5000®. Também foi possível desenvolver um guia completo de como se utilizar as ferramentas da Rockwell Automation, desde a construção do controlador *fuzzy* até os passos da própria integração do FuzzyDesigner® com o RSLogix 5000®, tornando o uso mais claro para qualquer usuário que já tenha tido contato com programação em *ladder*.

Foi possível integrar a rotina a um sistema supervisório, com simulação da planta do processo na própria ferramenta, tornando possível que o usuário teste e faça simulações mesmo sem ter acesso a plantas e sistemas físicos reais. Este sistema supervisório é capaz de se tornar uma importante ferramenta para análise e testes de estratégias de controle que poderiam ser impossíveis em um ambiente industrial. O *software* FactoryTalk® apresentou recursos suficientes sendo possível utilizar este *software* para tornar o sistema mais próximo de uma aplicação real, facilitando a operação.

A implementação do controlador *fuzzy* apresenta como vantagem não necessitar conhecer a função de transferência da planta, ao contrário do PID, que necessitou do modelo para realizar a sintonia dos parâmetros do controlador. Além disso, a situação de controle de vazão de embebição onde o sistema de controle seja baseado em regras empíricas, na prática pode ser mais eficaz, além de poder

atuar em regiões de não linearidades.

Com base na teoria de sistemas dinâmicos lineares e na área de controle, o controlador *fuzzy* pode ser também atraente para plantas as quais o seu modelo matemático seja difícil de estimar ou plantas mais complexas e com alto grau de dificuldade para análise.

Observou-se a simplicidade do FuzzyDesigner® e que o projeto de um controlador *fuzzy* é simples não exigindo grandes conhecimentos matemáticos do sistema, mas sim, conhecimento do funcionamento do sistema para criação da base de regras, ou seja, a maior dificuldade é conceitual de controle e não da utilização das ferramentas.

Portanto, o ambiente de simulação permite que a simulação de processos possa ser desenvolvida em ambiente industrial por pessoal não especializado em técnicas de simulação. Desta forma, o técnico ou o engenheiro de controle pode realizar experiências de simulação antes de implantar as estratégias de controle no processo real.

REFERÊNCIAS

FONSECA, M. O.; SILVA, C.; TORRES, B. S. **Avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle.** Revista InTech, n. 63, p. 32-37, 2004.

GARANITO, Rafael Domingos. **Equações de diferenças e aplicações**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Matemática e Engenharias da Universidade da Madeira. Agosto, 2006.

MANELLA, José Nazareno Anzanello. **Glossário de termos técnicos usados na indústria açucareira e alcooleira.** Maracaí: Markgraf, 2012.

RUBAAI, A., M. J. C. SITIRICHE & A. R OFOLI (2008), **'Design and implementation of parallel fuzzy pid controller for high-performance brushless motor drives: An integrated environment for rapid control prototyping'**, IEEE Transactions on Industrial Electronics 44, 1090-1098.

CAPÍTULO 13

ESTUDO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de Submissão: 02/12/2019

Pablo Rodrigues Lopes
Universidade Federal do Piauí
Teresina – PI
http://lattes.cnpq.br/4144564441619838

Rui Bertho Junior
Universidade Federal do Piauí
Teresina – PI
http://lattes.cnpq.br/3393376601554142

RESUMO: Neste trabalho são apresentadas as principais plataformas em hardware utilizadas por pesquisadores na validação de algoritmos de proteção. Também é discutida a possibilidade de uso do *Raspberry Pi 3B+* para esse fim. Sua performance em tempo real é avaliada através de testes de latência e atrasos, além da execução de uma rede neural. Os resultados mostram que é possível alcançar não somente uma boa previsibilidade no tempo de execução dos algoritmos, mas também um tempo de execução compatível com a proteção de sistemas de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Hardware; Raspberry Pi 3; Relés; Sistemas de Proteção; Sistemas de Tempo Real.

STUDY OF ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR POWER PROTECTION ALGORITHMS VALIDATION

ABSTRACT: This paper presents the main hardware platforms used by researchers for power protection algorithms validation. It is also discussed the possibility of using a Raspberry Pi 3B+ for this task. Its performance is evaluated by testing its latency and jitter, and also running a neural network. The results show that it acquires not only good predictability, but also runs algorithms in a acceptable time for power system protection.

KEYWORDS: Hardware; Protection Systems; Raspberry Pi 3; Real-time Systems; Relays.

1 I INTRODUÇÃO

A proteção de sistemas de potência desempenha um papel vital na entrega de energia elétrica aos seus usuários de forma segura e confiável. Recentes mudanças na rede elétrica como a geração distribuída e o grande número de cargas não lineares, as quais inserem no sistema de potência sinais harmônico dos mais variados, o leva a operar em seus limites de estabilidade e segurança (KUFFEL; FORSYTH; PETERS, 2016). Com isso, a proteção deve sempre se manter

atualizada para lidar com esses novos desafios. Várias pesquisas envolvendo novas técnicas de proteção vem sendo desenvolvidas e suas funcionalidades comprovadas. Contudo, essa validação de conceito geralmente só ocorre em ambientes simulados. Logo, de modo a se obter resultados comparáveis com relés digitais comerciais, uma variedade de plataformas em hardware vem sendo utilizadas para testar esses algoritmos em tempo real.

Sistemas em tempo real são sistemas sujeitos a severas restrições de tempo. Eles devem ser capazes de receber informações, processá-las, e retornar com uma resposta ou ação suficientemente rápida para interagir com o ambiente dentro de um limite de tempo pré-determinado (AXER et al., 2014). No caso de sistemas de proteção, essa é uma característica extremamente importante, uma vez que, na ocorrência de uma falta, ele deve operar no tempo no qual foi configurado e realizar todas as tarefas necessárias para extinguir a falha e isolar o elemento do sistema elétrico afetado por ela o mais rápido possível, sendo que as medidas devem ser as mais precisas possíveis.

Este artigo apresenta opções viáveis para validação de algoritmos de proteção, não as restringindo aos ambientes simulados. As plataformas em hardware mais comumente utilizadas por pesquisadores para essa tarefa são: *FPGA's*, Plataformas protótipo e microcontroladores (WANG; DINAVAHI, 2016; MONARO et al., 2012; MARTINS, 2017). Também será discutido a possibilidade de se usar o minicomputador de placa única *Raspberry Pi* da *Raspberry Foundation* como uma plataforma para testar tais algoritmos. Seu desempenho será avaliado através de testes de latência e atraso, além do tempo de processamento de algoritmos complexos.

2 I SISTEMAS EM TEMPO REAL

O termo "tempo real" pode ter vários significados dependendo do contexto em que se encontra. No que concerne este artigo, um sistema em tempo real deve possuir como principais características (AXER et al., 2014):

- Determinismo - O sistema responde a um determinado evento (entrada do sistema) sempre da mesma maneira;
- Previsibilidade – As tarefas que o sistema desempenha devem ocorrer em uma janela de tempo específica;
- Boa Perfomance - Os principais parâmetros de qualidade de um sistema em tempo real são baixa latência (tempo que uma informação leva para ir de um ponto ao outro do sistema), baixíssimo *jitter* (atraso na entrega da informação) e alta taxa de transferência de dados.

Tais características não são entregues por Sistemas Operacionais (SO's) de

propósito geral, como Windows e muitas variações do Linux, uma vez que tais sistemas são focados em ótima performance geral, flexibilidade e compatibilidade com as mais variadas plataformas físicas, ao invés de realizar tarefas específicas em tempo restrito (AXER et al., 2014). Assim, sistemas de proteção, que exigem tempos de resposta precisos, necessitam de um SO que opere em tempo real e um hardware capaz de entregar tal resposta. Isso os classifica como um sistema em tempo real crítico: todas as tarefas do sistema devem ocorrer em um tempo preciso e o atraso de uma delas faz com que todo o sistema falhe (AXER et al., 2014).

Dos sistemas em tempo real utilizados atualmente, a maior parte é derivada de sistemas Linux, uma vez que esse é um SO de código aberto e com ampla documentação. Para adicionar ao Linux as características em tempo real já mencionadas, muitos desses ambientes alteram a forma como o *kernel* funciona. O *kernel* é o núcleo do SO Linux, sendo um dos primeiros a inicializar, além de ser responsável por se comunicar com periféricos, processar dados para a CPU e lidar com as requisições do software (AXER et al., 2014).

Cada ambiente em tempo real reconfigura o *kernel* a sua maneira. Alguns deles são:

- *Preempt RT – Patch* (conjunto de instruções que alteram um programa ou SO) criado para o Sistema Operacional Linux, o qual configura o kernel do Linux para ser mais preemptivo (capacidade de interromper uma tarefa por outras de maior prioridade) (MCKENNEY, 2015);
- *Xenomai* - Co-kernel que trabalha em conjunto com o kernel não-preemptivo do Linux. As tarefas em tempo real são direcionadas para o co-kernel, lidando com as tarefas relacionadas ao kernel não-preemptivo como baixa prioridade (XENOMAI, 2019);
- *RTAI* - Solução dual-kernel alternativa (RTAI – THE REALTIME APPLICATION INTERFACE FOR LINUX, 2018).

A escolha sobre qual ambiente usar depende da compatibilidade com o hardware a ser utilizado e da restrição de tempo a qual uma aplicação está sujeita.

3 I HARDWARES PARA TESTES EM TEMPO REAL

Estabelecidas os parâmetros para sistemas em tempo real, os hardwares a serem utilizados para teste dos algoritmos de proteção devem atender aos requisitos exigidos por tais sistemas, de modo a entregarem uma resposta próxima à exigida por sistemas de proteção reais. Dentre as plataformas físicas mais comumente usadas nesses testes, temos: FPGA's, plataformas protótipo e microcontroladores.

3.1 FPGA'S

FPGA's são hardwares programáveis, formados por pequenos blocos lógicos, largamente utilizados no processamento de sinais digitais. Eles possuem características desejáveis para uso em proteção digital, como: execução mútua de tarefas, devido a sua arquitetura inerentemente paralela; baixa latência quando interfaceado com outros dispositivos, e alta velocidade de processamento, sendo capazes de rodar redes neurais complexas (ORDOÑES; PENTEADO; DA SILVA, 2005).

Alguns dos trabalhos desenvolvidos com esse hardware são apresentados a seguir.

Wang e Dinavahi (2016) desenvolveram um relé digital multifuncional implementado em uma Virtex-7 da Xilinx®. As funções implementadas, com seu respectivo código ANSI, foram:

- Direcional de Sobrecorrente (67);
- Distância (21);
- Sobre/Subtensão (59/27);
- Frequência (81);

Tais funções foram testadas em sistemas de potência simulados computacionalmente e em tempo real. Utilizando somente 39% do hardware disponível na placa, o relé desenvolvido demonstrou desempenho próximo ao de relés digitais comerciais, com a vantagem de consumir menos energia.

Mitra e Chattopadhyay (2019) elaboraram uma proteção de sobrecorrente adaptativa que considera a potência injetada na rede de distribuição por geração distribuída no ajuste do relé digital. Para validar sua metodologia, foi utilizada uma FPGA Cyclone IV, na qual o algoritmo foi embarcado. O sistema de potência utilizado foi simulado no ambiente do Simulink do Matlab®. O algoritmo proposto cumpriu seu objetivo e seu tempo de atuação é próximo a de relés comerciais no que se refere à sobrecorrente.

3.2 Plataformas Protótipo

Ao se referir a "plataformas protótipo", este artigo faz menção a hardwares que não possuem um uso específico, mas possuem blocos lógicos fixos, ao contrário de FPGA's. Tais plataformas foram adaptadas para executarem algoritmos de proteção, como foi feito pelos trabalhos a seguir.

Monaro et al. (2012) utilizaram o PC104 da PC/104 Consortium, a qual é utilizada em aplicações industriais, como plataforma de desenvolvimento de sua biblioteca *OpenRelay*, a qual contem desde funções de aquisição de sinais,

medição e transformações matemáticas, até funções básicas de proteção. O Linux foi utilizado como sistema operacional, com a extensão *RTAI* para lhe prover características em tempo real. Para testar a eficiência do sistema montado, proteções básicas de geradores foram implementadas: proteção diferencial (87G), proteção de sobrecorrente de fase instantânea (50) e proteção de sobrecorrente de neutro temporizada (51G-N). Em comparação com um relé comercial, constatou-se que ele possui tempos de atuação aceitáveis, validando a plataforma desenvolvida.

Pellini et al. (2013) criaram um *Intelligent Electronic Device* (IED) para proteção e automação, formado por um minicomputador IBM x86 industrial em conjunto com uma placa de aquisição de sinais. Como conexão para o sistema de potência, a plataforma possui 16 transformadores de instrumentação, sendo oito para tensão e oito para corrente, além de 16 entradas digitais, 16 saídas digitais e protocolos de comunicação IEC 61850, tornando-o um relé customizável. Novamente, seu SO é o Linux, mas o *patch* utilizado para desempenhar funções em tempo real é o Xenomai. Apesar de ter sido desenvolvido inicialmente para atuar como um religador automático, esta plataforma foi utilizada por Dantas, Pellini e Manassero Junior (2018) para testar um algoritmo de proteção diferencial no domínio do tempo, o qual foi validado pela plataforma.

3.3 Microcontroladores

Microcontroladores são circuitos integrados, geralmente formados por processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída (ORDONES; PENTEADO; DA SILVA, 2005). Eles são muito utilizados no controle dos mais variados periféricos e na automação de ambientes (ORDONES; PENTEADO; DA SILVA, 2005).

Alguns desses sistemas embarcados foram utilizados para validar algoritmos de proteção, como apresentado em Martins (2017). Ele faz uso da placa de desenvolvimento MSP432P401R da Texas Instruments para amostrar sinais e codificar os algoritmos de proteção. Esse sistema funciona em conjunto com o RTDS, o qual simula uma rede elétrica em tempo real. A validação da plataforma foi realizada pela codificação e teste de um algoritmo de religamento monopolar adaptativo rápido desenvolvido por Dias (2015). O algoritmo foi executado com sucesso, validando o sistema criado.

Feng, Qi e Pan (2017) desenvolveram um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão em corrente continua (CC). Para validar seu algoritmo, foi utilizado um BeagleBone Black, o qual possui dois módulos para aquisição de sinais em tempo real. Uma rede CC foi modelada em um Opal-RT, de modo a mensurar o tempo de resposta do algoritmo codificado no BeagleBone. O tempo necessário para

a localização da falta foi, em média, 0,5 ms, o que comprovou a eficácia não só do algoritmo, como também da plataforma em hardware.

4 I RASPBERRY PI E VALIDAÇÃO DE ALGORTIMOS DE PROTEÇÃO

Dentre os hardwares apresentados na seção anterior, percebe-se que a maioria deles requer um conhecimento específico de sua arquitetura, bem como o uso de linguagens de programação em baixo nível para codificá-los. Além disso, o custo de aquisição de muitas dessas plataformas é relativamente alto. Logo, utilizar um hardware de baixo custo e que possua um SO que permita a programação em alto nível é uma proposta atrativa para se implementar uma plataforma de validação de algoritmos de proteção.

4.1 Informações básicas sobre o Raspberry Pi

Criado pela *Raspberry Pi Foundation*, o *Raspberry Pi* é uma plataforma educacional usada no ensino de computação básica nas escolas (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2019). Contudo, sua versatilidade, portabilidade e custo reduzido o popularizaram entre vários campos da ciência, sendo muito utilizado em pesquisas acadêmicas e projetos computacionais relativos à Internet das Coisas (AQEEL, 2018). A Figura 1 ilustra a sua versão mais recente: o *Raspberry Pi 3B+* (RP3B+).

Figura 1 - Detalhes do hardware do Raspberry Pi modelo 3B+ (AQEEL, 2018).

Quanto ao SO, o sistema especificamente feito pela *Raspberry Pi Foundation* para o *Raspberry Pi* é o *Raspbian*, sendo este um SO de propósito geral. Porém, há várias distribuições Linux para o *Raspberry Pi* para as mais diversas finalidades.

Embora o uso do *Raspberry Pi* como plataforma de teste para algoritmos de

proteção não tenha sido encontrado na literatura, suas características inerentes o candidatam como uma plataforma viável para tal tarefa. Dentre elas, têm-se:

- **CPU** - Processador quad-core ARMv8-A, 64 bits e 1,4 GHz, o qual é mais potente que muitas das plataformas apresentadas na seção anterior;
- **GPIO** - Seus pinos que podem se comunicar com os mais diversos periféricos. Um exemplo seria um conversor A/D de alta resolução e múltiplos canais, através de uma comunicação serial;
- **SO** - Programação em alto nível.

4.2 Raspberry Pi e sistemas de potência

O *Raspberry Pi* já foi utilizado como elemento de automação, simulação e análise de sistemas de potência e seus elementos. Alguns desses trabalhos são citados a seguir.

John et al. (2017) realizaram a automação de uma subestação de 11 kV com o *Raspberry Pi*, sendo que ele atua como um Controlador Lógico Programável (CLP) com uma interface amigável e de fácil entendimento. Através de uma comunicação serial RS 485/USB com os diversos transdutores (tensão, corrente, potência, etc.) e estabelecendo uma relação mestre/escravo com eles, mostrou-se que a subestação não só opera de forma eficiente como também seus dados podem ser acessados remotamente.

Walter, Fakih e Grüttner (2013) utilizaram o *Raspberry Pi* como um simulador de um esquema de controle eletromecânico em tempo real, o qual se comunica com o ambiente Simulink do Matlab® no qual o motor e sensores são modelados. O Xenomai foi utilizado como *patch* para o tempo real nesse projeto. Todos os cálculos relativos à modelagem do motor, leitura dos sensores e atualização dos atuadores foi realizada em uma média 89 μs, sendo que o tempo máximo para a realização de todas essas tarefas era de 100 μs, o que validou o sistema de controle.

Leccese et al. (2016) desenvolveram um analisador de qualidade de energia de baixo custo com o *Raspberry Pi*. O sistema foi testado em algumas cidades italianas, a fim de averiguar a rede elétrica do país. Os resultados mostraram que o desempenho do sistema proposto é equiparável aos analisadores de energia que já se encontram instalados pelo país e pode se comunicar com eles facilmente. Todos os dados medidos são enviados a um servidor central, o qual pode ser acessado tanto localmente quanto remotamente.

4.3 Avaliação da resposta em tempo real do Raspberry Pi

De acordo com Molloy (2016), o *Raspberry Pi* não foi desenvolvido para operações em tempo real ou que requeiram alta precisão. Por exemplo, caso uma

amostra deva ser coletada pelo sistema e nesse instante o *kernel* estiver ocupado com outra tarefa, esta não pode ser interrompida, prejudicando assim a precisão do sistema. Contudo, há *patchs* disponibilizados pelas comunidades online do *Raspberry Pi* que modificam o *kernel* do SO *Raspbian*, a fim de lhe dar características preemptivas. Dentre os ambientes citados na Seção 2, tanto o *Preempt RT* quanto *Xenomai* possuem versões disponíveis para o *Raspberry Pi*.

De modo a verificar as características em tempo real do RP3B+, optou-se por instalar o *patch Preempt RT*, uma vez que o seu uso é mais simples do que *Xenomai*, o qual possui uma extensa documentação e comandos próprios. Foram utilizadas as instruções disponibilizadas por Tam (2018) para instalar o *Preempt RT* no RP3B+.

A avaliação da resposta em tempo real do RP3B+ é feita em duas etapas. Na primeira, sua latência é medida, enquanto que na segunda é medido o tempo de processamento de uma rede neural simples.

4.3.1 Medição de Latência

O primeiro teste consiste em medir a latência no RP3B+ no caso de uma interrupção (sinal emitido ao processador pelo hardware ou software sobre um evento que precisa de sua atenção imediata, sendo esta uma tarefa de alta prioridade) em software aconteça. Foram inseridos atrasos aleatórios entre 1 e 1100 μs para averiguar seus efeitos na latência. Quanto as interrupções em hardware, estas foram realizadas ao conectar eletricamente os pinos 15 e 16 da GPIO do RP3B+, sendo o pino 15 o transmissor e o pino 16 o receptor. Os resultados são apresentados na Tabela 1. O RP3B+ foi mantido em operação por uma hora, a fim de avaliar os efeitos do uso contínuo da plataforma nos valores de latência (foram geradas mais de dois milhões de interrupções). O código utilizado para realizar essas medidas foi disponibilizado por Roberts (2018).

	Latência (μs)		
	Média	**Máxima**	**Mínima**
Atrasos de até 50 μs	1,07	31	1
Atrasos acima de 50 μs	1,12	27	1
Entre pinos	1,15	27	1
	Variância (μs^2)		
Atrasos de até 50 μs	1,27		
Atrasos acima de 50 μs	1,46		
Entre pinos	1,04		

Tabela 1 – Resultados de latência para o RP3B+

Pela Tabela 1, percebe-se que nenhuma latência foi menor que 1 μs, uma vez que o contador utilizado foi o do próprio RP3B+, cuja resolução é de 1 μs. Nota-se também que a média das medições de latência, tanto em hardware quanto em software, foram em torno de 1 μs. O valor de variância também reflete a alta previsibilidade que o *Preempt RT* causa no RP3B+. Mesmo nos piores casos de latência, ainda assim valores baixos.

4.3.2 Processamento de algoritmos complexos

Outro ponto relevante na performance em tempo real de uma plataforma é quantidade de tempo que é dedicado na execução de um algoritmo. No caso de algoritmos de proteção, este deve realizar todas as operações necessárias entre o tempo de aquisição das amostras de tensão e corrente da rede elétrica. No caso do RP3B+, foi implementada uma rede neural básica, disponibilizado por Winkle (2018), a qual faz a classificação dos dados das flores Iris. Essa rede, após treinada, gera um arquivo *.data*, a qual contem as informações da rede. Ela é formada por quatro neurônios na camada de entrada: comprimento e largura da sépala e comprimento e largura da pétala; uma camada oculta, com quatro neurônios e peso Bias -1, e uma camada de saída com três neurônios. As possíveis saídas dessa rede são: Iris Setosa, Iris Versicolor e Iris Virgínica.

Novamente, o RP3B+ foi mantido em operação por uma hora de modo a registrar as variações no tempo de execução desse algoritmo. A média de tempo de execução dessa rede neural foi de 14 ms, sendo o valor mínimo 12,8 ms e o valor máximo 17,08 ms. O elevado tempo registrado ocorreu devido ao tempo necessário na leitura do arquivo de memória para então executar a rede. Para contornar esse problema, a rede foi programada diretamente em um arquivo *.c* e seu tempo de execução foi novamente medido. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

	Processamento (μs)		
	Média	**Máxima**	**Mínima**
Lendo memória	14323	17088	12820
Sem leitura de memória	104	1150	72
	Variância (μs^2)		
Lendo memória	2,32		
Sem leitura de memória	2,13		

Tabela 2 – Resultados de processamento para o RP3B+

Recomenda-se que Relés digitais de proteção possuam uma taxa de amostragem de 960 amostras por segundo, o que implica em um tempo de execução

para algoritmos de cerca de 1 ms (Santos, s. d.). Com base nos resultados da Tabela 2, não só o tempo de execução atingiu valores aceitáveis como ainda manteve a previsibilidade, devido à baixa variância.

5 I CONCLUSÃO

Este artigo apresentou as plataformas em hardware mais utilizadas por pesquisadores na validação de algoritmos de proteção. Embora eficientes, sua utilização requer um alto conhecimento técnico de seu hardware e seu custo de aquisição é geralmente elevado. Com isso, torna-se atrativo investigar outras plataformas mais acessíveis e que possam realizar essa tarefa tão bem quanto às usuais.

Foram apresentadas algumas pesquisas envolvendo o *Raspberry Pi* e suas possíveis aplicações dentro de sistemas de potência. Então, um teste foi realizado para mensurar sua performance em tempo real. Utilizando o *patch Preempt RT*, nota-se que há melhoras na previsibilidade do *Raspberry Pi*, além de baixos valores de latência e rápida reação a interrupções. Ao executar uma rede neural, foi possível manter essa previsibilidade e ainda executar o algoritmo em um tempo aceitável para sistemas de proteção.

Portanto, o *Raspberry Pi* se revela como uma viável plataforma para validação de algoritmos de proteção, com a capacidade de contemplar desde a aquisição de dados, amostragem, até medição e execução de funções básicas de proteção. Seu desempenho ainda pode ser ainda maior utilizando-se de algoritmos otimizados. Outro ponto de melhora seria o uso de um SO ou até um *patch* para tempo real diferentes.

REFERÊNCIAS

Aqeel, A. **Introduction to Raspberry Pi 3 B+.** The Engineering Projects. 2018. Disponível em:< https://www.theengineeringprojects.com/2018/07/introduction-to-raspberry-pi-3-b-plus.html>. Acessado em: 05/05/2019.

Axer, P. et al. **Building timing predictable embedded systems**. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), v. 13, n. 4, p. 82(1) – 82(37), 2014. Disponível em: < http://dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=2560033&type=pdf>. Acessado em: 05/05/2019.

Dantas, D.T., Pellini, E.L. and Manassero Junior, G. **Energy and reactive power differential protection hardware-in-the-loop validation for transformer application**. The Journal of Engineering, v. 15, p. 1160 – 1164, 2018. Disponível em: https://digital-library.theiet.org/deliver/fulltext/joe/2018/15/JOE.2018.0223.pdf;jsessionid=eb19k3luqk22.x-iet-live-01?itemId=/content/journals/10.1049/joe.2018.0223&mimeType=pdf&isFastTrackArticle= >. Acessado em: 05/05/2019.

Dias, O. F. da R. **Implementação do religamento monopolar adaptativo rápido baseado na assinatura harmônica de tensão no simulador digital em tempo real (RTDS)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.

br/handle/REPOSIP/259596>. Acessado em: 05/05/2019.

Feng, X.; Qi, L.; Pan, J. **A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 53, n. 3, p. 1834 – 1840, 2017. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/7847317>. Acessado em: 05/05/2019.

John. A. et al. **Automation of 11 kv substation using raspberry pi**. International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), p. 1 – 5, 2017. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8074264>. Acessado em: 05/05/2019.

Kuffel, R.; Forsyth, P.; Peters, C. et al. **The Role and Importance of Real Time Digital Simulation in the Development and Testing of Power System Control and Protection Equipment**. IFAC-PapersOnLine, v. 49, n. 27, p. 178 – 182, 2016. Disponível em: < https://design.ros2.org/articles/realtime_background.html>. Acessado em: 05/05/2019.

Leccese, F. et al. **A new power quality instrument based on raspberry-pi**. Electronics, v. 5, n. 4, p. 64, 2016. Disponível em: < https://www.mdpi.com/2079-9292/5/4/64/htm>. Acessado em: 05/05/2019.

Martins, C. A. P. **Desenvolvimento de hardware para aquisição de sinais e processamento de algoritmos de proteção e controle**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2017. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331452>. Acessado em: 05/05/2019.

McKenney, P. **A realtime preemption overview**. LWN.net. 2015. Disponível em: < https://lwn.net/Articles/146861/>. Acessado em: 05/05/2019.

Mitra, S.; Chattopadhyay, P. **Design and implementation of flexible Numerical Overcurrent Relay on FPGA**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 104, p. 797 – 806, 2019. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518307816>. Acessado em: 05/05/2019.

Molloy, D. **Exploring raspberry pi: interfacing to the real world with embedded linux**. Indianapolis (Ind.): Wiley, 2016.

Monaro, R.M. et al. **Sistema integrado para desenvolvimento e execução em tempo real de algoritmos de proteção de sistemas elétricos**. SBA: controle & automação, v. 23, n. 2, p. 202 – 215, 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/pdf/ca/v23n2/v23n2a07.pdf>. Acessado em: 05/05/2019.

Ordoñez, E.D.M.; Penteado, C.G; Da Silva, A.C.R. **Microcontroladores e FPGAs: aplicações em automação**. Novatec Editora, 2015.

Pellini, E.L. et al. **Custom distribution feeder recloser IED with high impedance protection function**. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, v. 22, p. 1 – 4, 2013. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/6683613>. Acessado em: 05/05/2019.

Raspberry pi foundation. 2019. **Raspberry pi 3 model b+**. Disponível em: < https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>. Acessado em: 05/05/2019.

Roberts, T. **Solution: Dedicating one core to a real-time process**. Raspberry pi forums. Disponível em: < https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=228727>. Acessado em: 05/05/2019.

RTAI - the realtime application interface for Linux. 2018. Disponível em: < https://www.rtai.org/>. Acessado em: 05/05/2019.

Santos, F. **4 relés**. Passei direto. [s.d]. Disponível em: < https://www.passeidireto.com/arquivo/37145472/4-reles/9>. Acessado em: 05/05/2019.

Tam, H. **Preempt-rt patched kernel 4.9.80 for raspberry pi 2, 3 (include 3b+)**. Github. 2018. Disponível em: <https://github.com/thanhtam-h/rpi23-4.9.80-rt>. Acessado em: 05/05/2019.

Xenomai. 2019. Disponível em: < https://xenomai.org/>. Acessado em: 05/05/2019.

Walter, J.; Fakih, M.; Grüttner, K. Hardware-Based Real-Time Simulation on the Raspberry Pi. Workshop on High performance and Real-time Embedded Systems, [S. I.], 2013. Disponível em: < https://pdfs.semanticscholar.org/52dd/916ea279d21a0d4335f80e181314a975fa70.pdf?_ga=2.200705198.1482294817.1567108814-132626642.1531676532>. Acessado em: 05/05/2019.

Wang, Y.; Dinavahi, V. Real-time digital multi-function protection system on reconfigurable hardware. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 10, n. 10, p. 2295 – 2305, 2016. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7503562>. Acessado em: 05/05/2019.

Winkle, L. V. Simple neural network library in ANSI C. Github. 2018. Disponível em: < https://github.com/codeplea/genann>. Acessado em: 05/05/2019.

CAPÍTULO 14

MODELAGEM INTELIGENTE NEBULOSA APLICADA À HIDROPONIA VIA SISTEMA EMBARCADO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de Submissão: 03/12/2019

Kayon Vinicius Lima Lopes
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/5491416686458487t

Danúbia Soares Pires
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/4739495583287970

Orlando Donato Rocha Filho
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/7455720877184126

RESUMO: Este projeto visa a utilização da Lógica Nebulosa para automatização e monitoramento das variáveis envolvidas no desenvolvimento de hortaliças em sistemas hidropônicos que exigem grande intervenção humana. A hidroponia é uma técnica alternativa de cultivo protegido, na qual o solo é substituído por uma solução aquosa contendo apenas os elementos minerais essenciais aos vegetais, e apresenta diversas vantagens em relação ao cultivo em solo, como: economia de água, precocidade na produção, e mínimo uso de defensivos agrícolas. Neste artigo propõe-se a criação de um sistema capaz de controlar a produção e o monitoramento de hortaliças em estufas para cultivo, coletando e controlando variáveis essenciais como temperatura, umidade, luminosidade, entre outras, utilizando-se da lógica nebulosa como ferramenta de modelagem.

PALAVRAS-CHAVE: Hidroponia; Sistema Inteligente; Controle Nebuloso; Sistemas Embarcados.

INTELLIGENT FUZZY MODELING APPLIED TO HYDROPONY VIA EMBEDDED SYSTEM

ABSTRACT: This project aims to use the fuzzy Logic for automation and monitoring of the variables involved in the development of vegetables in hydroponic systems that require large human intervention. Hydroponics is an alternative protected cultivation technique in which the soil is replaced by an aqueous solution containing only the mineral elements essential to the plants and presents several advantages in relation to soil cultivation, such as: water economy, precocity in production, and minimal use of pesticides. This paper proposes the creation of a system capable of controlling the production and monitoring of vegetables in greenhouses, collecting and controlling

essential variables such as temperature, humidity, luminosity, among others, using fuzzy logic as a modeling tool.
KEYWORDS: Hydroponics; Intelligent System; Fuzzy Control; Embedded Systems.

1 I INTRODUÇÃO

A hidroponia é uma técnica relativamente antiga, no entanto, só ganhou popularidade a partir de 1930, com a criação da nomenclatura pelo Dr. W. F. Gericke, da universidade da Califórnia. Consiste em uma técnica para o cultivo de plantas, sem solo, em meio hídrico, onde as raízes recebem uma solução nutritiva balanceada que contém água e todos os nutrientes essenciais ao desenvolvimento da planta, podendo reduzir em até 70% a quantidade de água utilizada (dos Santos et al, 2013), garantindo economia, precocidade, e higiene do produto.

Atualmente é mais difundida em países como a Holanda, Alemanha, Itália, Japão, Estados Unidos, México e áreas vizinhas da América Central. No Brasil, entretanto, esta técnica ainda não é muito difundida, sendo mais utilizada perto dos grandes centros urbanos onde as terras férteis são mais escassas e caras (Loschiavo, 2015).

Apesar de ser ainda incipiente no país, a tendência é que haja um aumento significativo do uso dessa técnica em diversas localidades onde o clima instável prejudica a produção agrícola.

Técnicas como esta ganharam muita importância ao longo dos anos, e estão sendo gradualmente empregadas para a agricultura comercial (JSM; Sridevi, 2014). Um dos sistemas mais utilizados é o *NFT* - *Nutrient film technique* - onde as plantas crescem tendo seu sistema radicular dentro de um canal ou canaleta onde circula uma solução nutritiva. Este sistema é composto basicamente por um tanque de solução nutritiva, um sistema de bombeamento dos canais de cultivo e um sistema de retorno ao tanque. A solução nutritiva é bombeada aos canais e escoa por gravidade formando uma fina lâmina de solução que irriga as raízes (de Abreu et al, 2015). O sistema *NFT* surgiu na Inglaterra em 1965 e é hoje o principal método de hidroponia utilizado no Brasil (Hidroponia, 2013).

O sistema MIMO inteligente nebuloso aplicado ao cultivo hidropônico apresentado neste artigo tem como objetivo a redução de custos e de erros no controle da produção, uma vez que o controle correto dos processos em um sistema de cultivo hidropônico influencia diretamente na produtividade, qualidade e precocidade do produto.

2 I JUSTIFICATIVA

O método de cultivo convencional apresenta várias desvantagens quando se

trata de clima, uma vez que mudanças de temperatura, umidade, diminuição de incidência solar e outros fatores podem comprometer seriamente a safra causando prejuízo (de Abreu et al, 2015).

Neste sentido, a automação é extremamente necessária para minimizar os prejuízos, através do controle de variáveis tais como a temperatura, luminosidade, umidade do ar, alcalinidade da água, entre outras, em abrigos de cultivo. Além de minimizar o risco de perda de safra, a automação possibilita uma maior qualidade dos produtos por proporcionar condições ideais para produção, e permite autonomia no cultivo, possibilitando que a mão-de-obra humana seja direcionada a atividades que exigem maior dedicação.

Existem várias técnicas de cultivo, entretanto, alguns métodos alternativos se mostram mais eficientes em alguns aspectos em relação ao plantio convencional em solo. Um deles é o cultivo em ambientes isolados, como estufas, onde há uma menor possibilidade do surgimento de pragas, fungos, entre outros (de Abreu et al, 2015). Dentro dessas estufas são instalados sistemas de cultivo de acordo com a técnica desejada. Neste artigo, o sistema de automação será feito com objetivo de auxiliar a técnica hidropônica *NFT*, já que esta, aliada à automação, possui muitas vantagens em relação ao plantio tradicional em solo, uma vez que um controle correto dos processos em abrigos de cultivo proporciona uma maior produtividade e melhor qualidade do produto (Alberoni, 1998).

Atualmente existem alguns trabalhos de automação hidropônica visando melhoria de controle em estufas, como em Goldstein (2018), Fonseca e Schmitz (2017), Azevedo Junior (2016), Matsura et al. (2015), Santos e Teruel (2010). No entanto, observa-se que esses trabalhos são baseados em lógica convencional (lógica booleana). Embora sejam eficientes em alguns casos, esses sistemas não permitem controlar a intensidade da iluminação ou ventilação fornecida por conta da sua natureza *crisp*. Assim, para o caso da iluminação e ventilação em estufas de cultivo, por exemplo, os estados possíveis seriam: ligado ou desligado. Neste contexto, a lógica nebulosa pode representar uma ferramenta eficiente na tomada de decisões, uma vez que utiliza raciocínio e linguagem natural, a fim de representar valores, os quais são expressos linguisticamente (Zanette et al, 2013), o que permite representar meios-termos em variáveis como, por exemplo, temperatura, que pode ser definida como alta, morna, média, baixa, entre outros, possibilitando o tratamento de incertezas, dando robustez ao sistema proposto, e proporcionando economia de energia ao permitir o controle de intensidade na iluminação e ventilação.

Com a utilização deste sistema, procura-se diminuir a intervenção humana na coleta de dados e no manejo do cultivo hidropônico, reduzindo os trabalhos repetitivos e os erros que normalmente acompanham estas atividades.

3 I METODOLOGIA

O sistema inteligente proposto neste artigo tem como base um modelo nebuloso desenvolvido utilizando o método de inferência de Mamdani. Neste método, a i-ésima regra do modelo é dada por:

$$R^{(i)} = SE\ x_1\ \text{É}\ A_i^{j*}\ E \ldots E\ x_n\ \text{É}\ A_i^{j*}\ ENTÃO\ y_1\ \text{É}\ B_i^{m*}\ E \ldots E\ y_n\ \text{É}\ B_n^{m*} \quad (1)$$

onde $x_{1,2,\ldots,n}$ corresponde às variáveis linguísticas do antecedente das regras nebulosas; $A_{1,2,\ldots,n}^{j*}$ correspondem às partições nebulosas das variáveis linguísticas; $y_{1,2,\ldots,n}$ são as saídas do modelo Mamdani, representadas pelas partições nebulosas $B_{1,2,\ldots,n}^{m*}$.

As entradas $x_{1,2,\ldots,n}$ do sistema foram definidas de acordo com a influência sobre o microclima dentro das estufas de cultivo. Em Rebouças et al (2014), o controle e o monitoramento de variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade, dentro de estufas hidropônicas é de suma importância, dado que as variações destas variáveis influenciam diretamente no desenvolvimento das culturas por meio de efeitos na transpiração e na fotossíntese, podendo interferir de maneira benéfica ou maléfica no desenvolvimento da planta. Além dos fatores supracitados, é importante considerar o efeito do horário e da incidência de radiação solar. Ainda em Rebouças et al (2014), as maiores variações de temperatura ocorrem entre as 12 e 16 horas, intervalo em que a temperatura do ar está mais elevada. Essas variações na temperatura, por sua vez, influenciam a umidade relativa dentro das estufas de cultivo que, durante o período diurno, diminui com grande intensidade e, durante a noite, aumenta rapidamente. Assim, devido à importância das variáveis meteorológicas e do horário, bem como a incidência solar, as variáveis definidas como as entradas x_i do sistema nebuloso proposto foram temperatura, umidade, período do dia e luminosidade.

As saídas y_i escolhidas foram as variáveis iluminação e ventilação interna. A iluminação representa um fator de muita importância nas estufas, uma vez que nem sempre a exposição direta à luz solar é possível; a ventilação interna, por sua vez, pode proporcionar uma redução considerável na temperatura e umidade no interior da estufa. O valor de saída da variável iluminação é destinada a um módulo de LEDs por meio de Modulação da Largura de Pulso (PWM, do inglês, *Pulse Width Modulation*) (Hirzel, 2016)para controle da intensidade luminosa. A função deste módulo é proporcionar uma compensação da luz solar por meio de LEDs RGB com comprimento de onda entre 630 nm e 460 nm, a fim de criar uma iluminação que possa suprir a necessidade de luz solar para garantir uma maior atividade fotossintética e, consequentemente, o pleno desenvolvimento das hortaliças cultivadas (Almeida, 2014). Alguns estudos, como em Jackson (2009), mostram técnicas que consistem

no aumento do período de exposição solar, chamado fotoperíodo, visando um aumento de precocidade na produção das safras. Baseado nestes estudos aplicou-se o acionamento da iluminação artificial no período das 18 h às 21 h. Este intervalo foi definido como um conjunto nebuloso da variável de entrada período, conforme o descrito na Tabela 1. A segunda variável de saída, ventilação, é destinada ao pino de controle de velocidade de duas ventoinhas para ajuste da ventilação por meio da exaustão e da entrada de ar no abrigo de cultivo.

Embora o sistema proposto possa subdividido em dois sistemas nebulosos independentes responsáveis pela iluminação e ventilação, devido à ausência de relação direta entre estas duas variáveis, optou-se por manter um único sistema, e, consequentemente, uma única base de regras, com o objetivo de evitar o aumento do custo computacional e tempo de resposta devido às instanciações dos dois sistemas diferentes.

A partir de um módulo de sensoriamento gerenciado por uma placa Arduino Mega, foi realizada a coleta de dados. Neste módulo, a aquisição dos valores das respectivas variáveis foi realizada por meio de sensores específicos para a plataforma Arduino. Utilizaram-se sensores DHT11 e DHT22 para obtenção dos dados de temperatura e umidade; um sensor LDR para medição dos valores de luminosidade e um módulo RTC DS1307 para obtenção do horário, conforme a Figura 1. A partir da análise de cada sensor verificou-se o universo de discurso (UD) de cada entrada do sistema nebuloso.

Figura 1. Modelo esquemático do sistema proposto

Na etapa subsequente à coleta dos dados, tem-se a inserção destes no controlador nebuloso. Para isso, realiza-se a etapa de *fuzzificação* das variáveis x_i. Os valores obtidos durante a coleta dos dados são mapeados para valores no intervalo de 0 a 1, dado por:

$$\mu_A(x) \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

onde $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência de x ao conjunto *A*.

A *fuzzyficação* avalia o grau de pertinência da entrada numérica, x_i, com ativação das regras para composição dos conjuntos nebulosos de saída, os quais serão *defuzzyficados* gerando um resultado numérico para a saída y_i (Cavalcanti et al., 2012).

As partições nebulosas $A^{j*}_{1,2,\ldots,n}$ foram definidas para cada variável x_i, e os conjuntos foram modelados utilizando funções de pertinência do tipo triangular considerando o suporte dos conjuntos nebulosos especificados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 para as variáveis período, temperatura, umidade e luminosidade, respectivamente.

Conjunto	Suporte
Madrugada	*0<x<6*
Manhã	3<x<12
Tarde	11<x<17
Entardecer	16<x<23
Noite	21<x<24

Tabela 1: Conjuntos nebulosos para a variável Período.

Conjunto	Suporte
Baixa	*0<x<21*
Média	*12<x<45*
Alta	33<x<50

Tabela 2: Conjuntos nebulosos para a variável Temperatura.

Conjunto	Suporte
Baixa	*0<x<40*
Média	18<x<90
Alta	70<x<100

Tabela 3: Conjuntos nebulosos para a variável Umidade.

Conjunto	Suporte
Baixa	*0<x<400*
Média	170<x<850
Alta	570<x<1023

Tabela 4: Conjuntos nebulosos para a variável Luminosidade.

Na Tabela 4, o universo de discurso da luminosidade é a faixa de valores compreendidos entre 0 a 1023. Este intervalo é resultado do mapeamento dos valores lidos pelo Arduino, a partir da tensão detectada no pino do sensor LDR (Lima, 2017). Esta tensão pode variar de 0 a 5V e, por meio de um conversor analógico-digital de 10 bits de resolução, é mapeado para um faixa de 0 a 1023 unidades, onde cada uma corresponde a 4,9mV de tensão (Arduino, 2017). Por se tratar de um resistor dependente de luz, a relação entre o valor lido pelo Arduino e a incidência de luz é inversamente proporcional. Quanto maior a luminosidade no ambiente, menor será o valor lido.

As partições nebulosas $B^{m*}_{1,2,\ldots,n}$ foram definidas para cada variável de saída y_i, utilizando funções de pertinência triangulares considerando os suportes especificados nas Tabelas 5 e 6.

Conjunto	Suporte
Baixa	*0<x<127*
Média	0<x<255
Alta	127<x<255

Tabela 5: Conjuntos nebulosos para a variável Ventilação.

Conjunto	Suporte
Baixa	*0<x<128*
Média	58<x<193
Alta	128<x<255

Tabela 6: Conjuntos nebulosos para a variável Iluminação.

Nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são observadas as funções de pertinência das variáveis de entrada consideradas no sistema. Nas Figuras 6 e 7 são mostradas as funções de pertinência das variáveis de saída.

Figura 2. Funções de pertinência da variável Temperatura.

Figura 3. Funções de pertinência da variável Umidade.

Figura 4. Funções de pertinência da variável Período.

Figura 5. Funções de pertinência da variável Luminosidade.

Figura 6. Funções de pertinência da variável Ventilação.

Figura 7. Funções de pertinência da variável Iluminação.

Após a coleta dos dados e a *fuzzificação* dos valores de cada variável, responsável por realizar a conversão dos valores escalares para valores nebulosos correspondentes, inicia-se a etapa de processamento das regras existentes na base de regras: a máquina de inferência nebulosa realiza as operações entre os conjuntos $A^{j*}_{1,2,\ldots,n}$, para obtenção dos conjuntos nebulosos $B^{m*}_{1,2,\ldots,n}$. As regras possuem

estrutura conforme Equação 1. Algumas das regras utilizadas no sistema proposto são observadas na Tabela 7.

Regras utilizadas	
1	Se Temperatura é Alta e Umidade é Alta então Ventilação é Alta
2	Se Temperatura é Alta e Umidade é Média então Ventilação é Alta
3	Se Temperatura é Alta e Umidade é baixa então Ventilação é Alta
⋮	⋮
11	Se Temperatura é baixa e Umidade é Alta então Ventilação é Média
12	Se Luminosidade é baixa e Horário é Manhã então Iluminação é Média
13	Se Luminosidade é Alta e Horário é Tarde então Iluminação é Desligada
⋮	⋮
27	Se Período é Noite então Iluminação é Desligada
28	Se Período é Madrugada então Iluminação é Desligada

Tabela 7: Regras utilizadas no sistema proposto

Por fim, os conjuntos nebulosos obtidos pela inferência precisam ser convertidos para uma saída numérica, possibilitando o acionamento das saídas pela placa Arduino. Neste ponto é necessário realizar a *defuzzificação* da saída obtida na etapa de inferência. Para isto, foi utilizado o método do *centróide* que consiste no cálculo, para um dado conjunto nebuloso proveniente do processo de inferência, da abcissa do ponto de centro de massa (Rezende, 2003), dado conforme segue:

$$y^* = \frac{\sum_{m=1}^{N_y} y_m \mu_0(y_m)}{\sum_{m=1}^{N_y} \mu_0(y_m)} \tag{3}$$

onde y_m é o valor central da regra m e N_y é o número de regras do sistema nebuloso. A partir desse ponto, de posse dos valores numéricos obtidos, as tomadas de decisão são realizadas e o acionamento das saídas é feito de acordo com as regras ativas no instante considerado.

O controlador nebuloso embarcado em uma placa Arduino Mega foi então submetido a testes para averiguar a robustez dos sensores utilizados e para garantir a correta aferição dos valores de entrada das variáveis, bem como avaliar o processo de inferência e o acionamento das saídas. As Figuras 8 e 9 mostram a implementação do sistema proposto em um protótipo, com uma ventoinha, para a representação da variável de saída denominada ventilação, e um LED, para a representação da variável de saída denominada iluminação.

Figura 8. Detalhe da plataforma.

Figura 9. Protótipo implementado.

4 I RESULTADOS

Os resultados experimentais mostraram a eficiência da metodologia proposta, uma vez que o sistema apresentou resultados satisfatórios para controle da temperatura e iluminação.

São mostradas as superfícies obtidas com a aplicação do método proposto, a partir de um modelo nebuloso Mamdani e método do centroide para as saídas ventilação e iluminação, nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10. Superfície representando a ventilação em função da umidade e temperatura.

Figura 11. Superfície representando a iluminação em função do período e luminosidade.

5 I CONCLUSÕES

A aplicação da lógica nebulosa se mostrou bastante adequada para o problema proposto. A variação suave das saídas - diferentemente dos sistemas com saídas *ON/OFF* - permitiu um melhor gerenciamento do ponto de vista energético, uma vez que a potência fornecida à iluminação e à ventilação eram controladas conforme o horário e a luminosidade já presente no ambiente.

A facilidade de implementação do conhecimento do especialista e modificação da base de regra se mostra uma característica bem desejada, dado que possibilita que sejam acrescentadas instruções para controle do microclima de acordo com a cultura definida para cultivo. Assim, torna-se possível cultivar vários tipos de hortaliças adaptadas a diferentes microclimas apenas inserindo novas regras.

Mais variáveis podem ser adicionadas, no entanto, o número de componentes

necessários será maior, bem como o número de regras aumentará consideravelmente. Portanto, o sistema como um todo tornar-se-á bastante complexo. Contudo, como proposta futura, um modelo com mais variáveis será formulado. Ainda como proposta futura, tem-se a criação da interface sistema-usuário para exibição de dados e gerenciamento do sistema como um todo.

REFERÊNCIAS

ALBERONI, R. **Hidroponia: como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo**. *São Paulo: Nobel*, 1998.

ALMEIDA, Camila do Carmo et al. **Sistema eletrônico baseado em diodos emissores de luz (LEDs) para aplicação em estudos de fisiologia vegetal**. 2014.

ARDUINO. **AnalogRead().** 2017. Disponível em: <https://www.arduino.cc/ reference/pt/language/ functions/analog-io/analogread/>. Acesso em: 22 fev. 2019.

AZEVEDO JUNIOR, Amber Leite de. **Sistema de monitoramento e climatização de estufa de pequeno porte em um contexto doméstico**. 2016.

CAVALCANTI, José Homero Feitosa. Et al. **Lógica Fuzzy Aplicada Às Engenharias**. João Pessoa PB, 2012.

DE ABREU, Cristiano Santos Pereira et al. **Automação de abrigos de cultivo para culturas hidropônicas**. 2015.

DOS SANTOS, José Darcy et al. **Development of a vinasse nutritive solution for hydroponics**. Journal of environmental management, v. 114, p. 8-12, 2013.

FONSECA, Felipe Augusto da; SCHMITZ, Luiz. **Sistema microcontrolado para estufas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GOLDSTEIN, Harry. **The green promise of vertical farms** [Blueprints for a Miracle]. IEEE Spectrum, v. 55, n. 6, p. 50-55, 2018.

TUDO HIDROPONIA (Org.). **NFT: Um tipo de Hidroponia.** 2013. Disponível em: <tudohidroponia.net/ nft-um-tipo-de-hidroponia/>. Acesso em: 01 dez. 2019.

HIRZEL, Timothy. **PWM.** 2016. Disponível em: <https://www.arduino.cc/ en/Tutorial/PWM>. Acesso em: 01 dez. 2019.

JACKSON, Stephen D. **Plant responses to photoperiod**. New Phytologist, v. 181, n. 3, p. 517-531, 2009.

JSM, Lenord Melvix; SRIDEVI, C. **Design of efficient hydroponic nutrient solution control system using soft computing based solution grading**. In: 2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC). IEEE, 2014. p. 148-154.

LIMA, Fabrício S. **Sistema mimo inteligente nebuloso para controle de iluminação**. *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, RS*, 2017.

LOSCHIAVO, Rafael. **O que é Hidroponia?.** 2015. Disponível em: <www.ecoeficientes.com.br/o-que-e-hidroponia/>. Acesso em: 01 dez. 2019.

MATSURA, Debora Umeno et al. **Sistema de controle de abastecimento de água e energia no cultivo hidropônico nft water supply control system and energy growing hydroponic nft**. 2015.

REBOUÇAS, Perila Maciel et al. **Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido**. Revista Agrogeoambiental, v. 7, n. 2, 2014.

REZENDE, Solange Oliveira. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Editora Manole Ltda, 2003.

SANTOS, Pollyana da Silva de Magalhães. **HORTA HIDROPÔNICA AUTOMATIZADA POR MICROCONTROLADOR**.

TERUEL, Bárbara J. **Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e fertigação**. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental-Agriambi, v. 14, n. 3, 2010.

ZANETTE, Adriano; RADANOVITSCK, Eduardo Aquiles; GONÇALVES, William Wolmann. **Fuzzy Logic.** 2006. Disponível em: <https://www.inf.ufrgs. br/~mrpritt/lib/exe/fetch.php?media=inf05508:t-a-fuzzy.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2019.

CAPÍTULO 15

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

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 10/12/2019

Rennan Santos de Araujo
Universidade Federal do ABC
Santo André – São Paulo
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4412055J2

Luiz Alberto Luz de Almeida
Universidade Federal do ABC
Santo André – São Paulo
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4785395E9

Felipe Sadami Oiwa da Costa
Universidade Federal do ABC
Santo André – São Paulo
http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K8754865J1

RESUMO: A computação neuromórfica caracteriza um recente paradigma de arquitetura computacional que, respaldando-se na estrutura de um sistema neural biológico, almeja ser uma alternativa mais eficiente para o processamento de informações em larga escala. Atendendo a principal força motriz da computação neuromórica, a economia energética, este trabalho propõe um novo modelo de neurônio, estimulado por impulsos codificados por PRBS (Pseudorandom Binary Sequence) e modulados por PWM (Pulse Width Modulation), cuja memristência e ativação são baseadas no comportamento das dinâmicas térmicas e não lineares de transição de fase do composto inorgânico dióxido de vanádio VO_2. Embasando-se nos resultados positivos obtidos pelas simulações computacionais neste trabalho, é esperado que esta nova proposta de neurônio artificial, quando implementada em uma rede neural pulsada, seja capaz de estabelecer maiores índices de plasticidade neural e eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: Codificação de Impulsos PRBS-PWM; Eficiência Energética; Dióxido de Vanádio; Memristência; Redes Neurais Pulsadas.

VANADIUM DIOXIDE MEMRISTIVE NEURON MODEL BASED ON PRBS-PWM PULSE ENCODING

ABSTRACT: Neuromorphic computing features a recent paradigm of computational architecture that, based on the structure of a biological neural system, aims to be a more efficient alternative for the large-scale information processing. Attending to neuromorphic computing main driving force, the energy economy, this work proposes a new neuron model, stimulated by pulses encoded by PRBS (Pseudorandom Binary Sequence) and modulated by PWM

(Pulse Width Modulation), whose memristence and activation are based on the behavior of the thermal and nonlinear phase transition dynamics of the inorganic compound vanadium dioxide VO_2. Based on the positive results obtained by the computational simulations in this work, it is expected that this new proposal of artificial neuron, when implemented in a spiking neural network, will be able to establish higher standards of neural plasticity and energy efficiency.
KEYWORDS: PRBS-PWM Pulse Encoding; Energy Efficiency; Vanadium Dioxide; Memristence; Spiking Neural Networks.

1 I INTRODUÇÃO

A computação neuromórfica pode ser definida como um modelo bioinspirado e, relativamente, contemporâneo de organização computacional que, baseando-se na complexa mecânica de atividades de um circuito neural biológico, objetiva ser uma alternativa mais eficiente para o processamento de informações, "ameaçando" a preponderante hegemonia da consolidada Arquitetura de von Neumann (WRIGHT, 2013).

Tendo em vista o iminente fim do efeito da lei publicada pelo químico estadunidense Gordon Earle Moore, em 1965, que constatava que a cada 18 meses, a capacidade de processamento dos chips aumentaria em 100%, ou seja, dobraria, sem que houvesse alterações no custo (WALDROP, 2016), pesquisas recentes, regularmente alicerçadas na sólida concepção abstraída por Carver Mead, em 1990 (MEAD, 1990), indicam que estruturas computacionais, inspiradas no funcionamento de complexas arquiteturas neurobiológicas, apresentam um grande potencial para tornarem-se uma alternativa eficiente para o futuro da computação.

Esta arquitetura bioinspirada, diferentemente daquela proposta por John von Neumann, em 1945, não apresenta uma unidade central de processamento, dividida em subunidades de controle e lógica, que, através do uso de registradores e ponteiros, armazenam e processam dados (JO, 2010). Nesta nova abordagem, toda a manipulação da informação é efetuada por intermédio de redes neurais artificiais, constituídas por "neurônios" e inúmeras interconexões, denominadas "sinapses", entre os mesmos, que contribuem para que os dados sejam paralelamente processados e persistidos de uma maneira rápida, acurada, energeticamente eficiente e robusta em relação a eventuais falhas locais (MEAD, 1990).

Historicamente, a redução do custo energético de operações computacionais sempre foi um fator de suma relevância no desenvolvimento de novas tecnologias e este talvez seja o principal fator benéfico da computação neuromórfica (MEAD, 1990). Esta característica está fortemente ligada à arquitetura massivamente paralela das redes neurais artificiais, que pode ser implementada de maneira analógica ou digital

através do uso de transistores convencionais ou, mais recentemente, memristores baseados em materiais óxido metálicos (JO, 2010). No caso deste trabalho, o dióxido de vanádio.

Atualmente, pesquisas apontam diversas aplicações para a computação neuromórfica, em variados campos da ciência, destacando sua alta aptidão para o reconhecimento de padrões e memory retrival (INDIVERI, 2009).

Vale-se destacar uma pesquisa realizada por um conjunto de cientistas afiliados ao Advanced Nanoscale Engineering Group, da Universidade de Oxford, que ambiciona desenvolver dispositivos de hardware integralmente implementados através de circuitos fotônicos que sejam capazes de simular sinapses neurais biológicas. A pesquisa evidencia que o uso de recursos ópticos possibilita que as simulações possam ocorrer em velocidade ultrarrápida, utilizando uma largura de banda virtualmente ilimitada e com uma alta taxa de redução de perda de potência elétrica (CHENG, 2017).

Outra importante contribuição para o desenvolvimento de sistemas neuromórficos complexos foi realizada através de uma pesquisa, publicada no primeiro semestre de 2017, que almejava investigar técnicas de aplicações de memória auto-associativa e reconhecimento de padrões em um sistema de osciladores micro-mecânicos (KUMAR e MOHANTY, 2017). Os resultados revelaram que a computação neuromórfica, quando aplicada de maneira física em um sistema de osciladores micro-mecânicos, através de um processo fabricação baseado em silício, produz um considerável nível de acréscimo na robustez contra ruídos e variações no processo de manufatura (KUMAR e MOHANTY, 2017).

Objetivando proporcionar uma maior facilidade nas simulações numéricas de sistemas computacionais neuromórficos memristivos, em maio de 2018, foi publicado um artigo com a proposta de uma plataforma customizável de software que, potencialmente, é capaz de emular o comportamento e representar as dinâmicas não-lineares de um sistema neural memristivo (XIA, 2018). A ferramenta desenvolvida, intitulada MNSIM, além de utilizar de diferenciadas métricas de desempenho para estimar as taxas de erros computacionais, também alcançou excelentes níveis de rapidez na execução de suas tarefas (XIA, 2018).

Grande parte das pesquisas recentes, no campo da computação neuromórfica, está direcionada a aplicações e simulações de sistemas neurais memristivos. Esta subclasse de sistemas neuromórficos concentra-se em abstrair modelos que sejam capazes de implementar a neuroplasticidade em redes neurais artificiais através do uso de memristores (MERKEL, 2016).

O memristor é um componente eletrônico passivo e não-volátil, de função não-linear, que apresenta a capacidade de processar e persistir dados com uma economia energética muito superior a sistemas que empregam a tecnologia CMOS

(Complementary Metal Oxide Semiconductor) (MERKEL, 2016). Este componente, cuja condutância pode ser precisamente modulada por carga e fluxo, quando presente na estrutura de um neurônio baseado em um material semicondutor óxido-metálico, pode possibilitar a implementação da plasticidade sináptica neural no sistema (JO, 2010).

A plasticidade sináptica neural refere-se à capacidade de um sistema neural se reestruturar em resposta a experiências ou estímulos (TSODYKS, 1998). Este processo, que promove uma constante remodelação e rearranjamento dos mapas neurosinápticos, objetiva viabilizar um maior nível de acurácia, conectividade e densidade para redes neurais artificiais (JO, 2010).

Neste trabalho, é proposto um novo modelo de neurônio artificial, estimulado por impulsos codificados em PRBS-PWM, cuja memristência e ativação baseiam-se no comportamento dinâmico do composto dióxido de vanádio.

O restante deste estudo está organizado da seguinte forma: Nas Seções 2, 3 e 4, são realizadas introduções teóricas sobre os seguintes temas: Redes neurais artificiais, redes neurais pulsadas, plasticidade neural e auto-organização de mapas neurais. Em sequência, na Seção 5, são apresentados os detalhamentos do modelo proposto por este trabalho. Na Seção 6, é descrita a metodologia de pesquisa e os resultados obtidos são expostos e analisados. Por fim, a Seção 7 encerra este artigo retratando as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

2 I REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes neurais artificiais (RNAs) são modelos computacionais que se baseiam em simular as capacidades cognitivas de um sistema nervoso biológico com o intuito de viabilizar uma estrutura capaz emular o comportamento inteligente do cérebro (HAYKIN, 1994; RAUBER, 2005). Uma RNA é, geralmente, estruturada por diversas unidades de processamento de dados, denominadas “neurônios”, que estão interconectadas entre si, por intermédio de “sinapses”, e propagam informações através de estímulos (HAYKIN,1994).

Figura 1 – Modelo de neurônio artificial baseado na concepção de McCulloch e Pitts

A Figura 1 reproduz o consolidado modelo de neurônio artificial proposto pelos cientistas Warren McCulloch e Walter Pitts, em 1943, para representar as dinâmicas biológicas que se manifestam dentro de uma célula do sistema nervoso (MCCOLLOCH e PITTS, 1943). Neste consistente modelo, os impulsos, provenientes de neurônios vizinhos, se tornam entradas x_j que, posteriormente, são adaptadas por seus respectivos pesos sinápticos w_j. Em seguida, é realizada uma combinação linear das entradas que resulta no valor de *net*. O valor de *net*, por sua vez, é comparado com um limiar μ, através da função de heaviside, e o resultado da comparação implica diretamente em um eventual "disparo", representado pela saída *y*. A Equação (1) representa, matematicamente, o modelo da Figura 1 em função de *y*.

$$y = \Theta\left(\sum_{j=1}^{D} w_j x_j - \mu\right) \qquad (1)$$

Um neurônio artificial, regularmente, pode ser estimulado por diferentes tipos de funções de ativação, sendo as mais comuns: A função linear, na qual a saída é um sinal linear contínuo; a função degrau (ou heaviside), que produz uma saída não-linear discreta, e a função sigmoidal, que resulta em uma sinal não-linear contínuo (RAUBER, 2005). As ativações fazem com que impulsos sejam enviados para neurônios vizinhos e proporcionem um constante índice de conectividade na RNA (HAYKIN, 1994).

O conceito de conectividade da RNA está ligado à topologia à qual a mesma está sujeita, ou seja, a forma à qual os neurônios estão distribuídos e interligados entre si (HAYKIN, 1994; RAUBER, 2005). Uma topologia bem estruturada possibilita uma maior fluidez na propagação de informações na RNA (RAUBER, 2005).

As RNAs são, usualmente, implementadas por software e possuem diversas aplicações na resolução de problemas de variadas áreas do conhecimento, através da aptidão das mesmas para reconhecimento de padrões, aprendizagem de máquinas, clustering e mineração de dados (RAUBER, 2005).

Para que a implementação da RNA seja considerada eficiente, é essencial que esta apresente um bom nível de plasticidade neural, característica responsável por tornar a rede mais dinâmica e engenhosa.

3 I PLASTICIDADE NEURAL E AUTO-ORGANIZAÇÃO DE MAPAS NEURAIS

Por um longo período de tempo, vigorou-se uma preponderante teoria de que, após o seu desenvolvimento, o sistema nervoso central convertia-se em uma estrutura completamente inflexível e sujeita a danos permanentes (FERRARI, 2001). Atualmente, sabe-se que, durante todas as fases da ontogenia, o cérebro continua

evidenciando características de reconstrução e reorganização de suas propriedades morfológicas e funcionais em resposta a experiências vivenciadas (DE OLIVEIRA, 2001; FERRARI, 2001). Esta capacidade cerebral é, frequentemente, denominada "plasticidade neural" e está, diretamente, associada aos processos de aprendizagem, memória e recuperação de lesões no sistema nervoso central (FERRARI, 2001).

Figura 2 – Estágios nos quais ocorre a plasticidade neural

A plasticidade neural, geralmente, acontece nos três estágios ilustrados na Figura 2: Desenvolvimento, aprendizagem e período pós-lesão (DE OLIVEIRA, 2001).

O desenvolvimento de um sistema neural inicia-se na embriogênese e encerra-se, somente, no período extrauterino. Durante este intervalo de tempo, o cérebro sofre diversas influências genéticas, provenientes do microambiente fetal, e externas, fazendo com que a plasticidade seja uma atividade essencial para estruturação das funções do sistema nervoso (DE OLIVEIRA, 2001).

A aprendizagem é um processo que pode ocorrer em qualquer momento da vida e refere-se à capacidade de se adquirir um determinado conhecimento, armazená-lo e integrá-lo, de maneira interconectada, aos demais conhecimentos já persistidos, possibilitando que o mesmo possa ser acessado, posteriormente, quando requisitado (DE OLIVEIRA, 2001). No decorrer do processo de aprendizagem, ocorrem diversas modificações estruturais do sistema nervoso que promovem alterações plásticas como o incremento de neurotransmissores, crescimento de terminações, estreitamento da fenda sináptica, etc (DE OLIVEIRA, 2001).

O ato de aprender novas habilidades motoras também promove restruturações, ou auto-organizações, no mapa neural do sistema nervoso (DE OLIVEIRA, 2001). Os mapas neurais são responsáveis por estruturar modelos que objetivam constituir repostas a estímulos que o sistema nervoso está sujeito e, durante o processo de aprendizagem, estes se auto-organizam para assegurar uma maior acurácia para com as respostas (SPORNS, 2005).

No período pós-lesão, ou seja, após o sistema nervoso ser afetado por processos lesionários, que em eventuais casos podem necrosar células nervosas, mecanismos de plasticidade neural são acionados e, durante um longo período de tempo, trabalham para reparar e reestruturar o sistema nervoso central, recuperando, entre outras habilidades, sua eficácia sináptica e supersensibilidade de denervação

(DE OLIVEIRA, 2001).

Em suma, a plasticidade neural altera padrões de conectividade no cérebro com o intuito de torná-lo mais “inteligente” e tolerante a falhas.

4 I REDES NEURAIS PULSADAS

Atualmente, as redes neurais pulsadas, ou baseadas em spikes, representam o modelo de RNA cujo funcionamento mais se aproxima de um neurônio biológico natural (MAASS, 1997). Nestes modelos, os sinais de entrada dos neurônios, estando estes em forma de impulsos, podem conter informações ou variáveis codificadas, através da diferença de tempo do intervalo entre os spikes, que, posteriormente, acarretarão, ou não, no disparo do neurônio (MAASS, 1997).

A codificação das informações transmitidas entre neurônios, através de impulsos, está usualmente relacionada à frequência (rate encoding) ou tempo (pulse encoding) dos spikes (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009). A codificação por tempo de spikes é, habitualmente, mais eficaz que a codificação por frequência, tendo em mente que esta pode prover uma maior quantidade de informações codificadas, utilizando o mesmo número de neurônios (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009).

Enquanto a variável “tempo” é constantemente trivializada em modelos de redes neurais de gerações anteriores, em redes neurais pulsadas, esta é extremamente primordial para um acurado funcionamento do sistema neural (MAASS, 1997). O tempo apresenta uma direta implicância na combinação linear dos potenciais pós-sinápticos excitatórios e inibitórios, resultantes dos disparos de neurônios vizinhos e conectados através de sinapses, que, por intermédio da aplicação de pesos sinápticos e de uma função de ativação pré-estabelecida, pode fazer com que o potencial do neurônio atinja um determinado valor de threshold e, consequentemente, efetue o disparo (MAASS, 1997).

Os pesos sinápticos, em redes neurais pulsadas, frequentemente, possuem o papel de restringir os sinais de entrada a valores não nulos, tendo em mente que as sinapses biológicas e, por consequência, os potenciais pós-sinápticos, são, estritamente, excitatórias (positivas) ou inibitórias (negativas) (MAASS, 1997). Quando o neurônio não apresenta valores de potenciais pós-sinápticos, é, matematicamente, conveniente assumir que o potencial de ativação equivale a zero e o threshold será sempre maior que zero (MAASS, 1997).

Figura 3 – Representação da função de threshold de um neurônio biológico

Normalmente, a função de threshold, quando bem especificada, é responsável por proporcionar um certo intervalo de tempo entre os disparos do neurônio (MAASS, 1997). Este intervalo é constituído pelas de fases de "repolarização" e "hiperpolarização" (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009). Simulando um neurônio biológico em um cenário determinístico (sem ruídos), a Figura 3 evidencia que *t'*, representando o valor de tempo no qual ocorreu o disparo mais recente, deve, teoricamente, no momento em que $P_v(t)$ equivaler ao valor da função de threshold $\Theta_v(t-t')$, efetuar o disparo. Após o disparo, os potenciais pós-sinápticos se alteram baseando-se nos valores dos tempos dos spikes do próprio neurônio em questão (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009).

Este alto nível de detalhamento do funcionamento de uma rede neural pulsada, que promove um maior grau de realidade na emulação de neurônio biológico, por muitas décadas foi, computacionalmente, inviável e mesmo quando ocorreram avanços tecnológicos que possibilitariam o desenvolvimento de tal modelo, os algoritmos de aprendizagem correntes daquela época, devido a suas incompatibilidades com a complexidade de novos paradigmas, se tornaram os gargalos deste progresso (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009). Atualmente, grande parte dos estudos que ambicionam promover avanços significativos na estruturação dos modelos de redes neurais pulsadas, foca-se no desenvolvimento de novos algoritmos de aprendizagem que possam suprir as complexidades geradas quando a rede se torna muito grande (GHOSH-DASTIDAR e ADELI, 2009).

Em síntese, diversas pesquisas recentes têm demonstrado que as redes neurais pulsadas apresentam uma grande aptidão para resolver problemas complexos de reconhecimento padrões, como resultado de seu alto potencial de promoção de plasticidade e representação dinâmica, além de apresentar uma notável disposição para codificar, com maior acurácia, as informações transmitidas entre neurônios interconectados.

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

Alicerçando-se nos conceitos apresentados anteriormente, este trabalho almeja apresentar um novo modelo de neurônio, estimulado por impulsos codificados por PRBS (Pseudorandom Binary Sequence) e modulados por PWM (Pulse Width Modulation), cuja memristência e ativação são assentadas pelo comportamento das dinâmicas térmicas e não lineares de transição de fase do composto inorgânico óxido-metálico dióxido de vanádio (VO_2). É, também, conjecturado que este novo paradigma de neurônio, quando presente em uma RNA pulsada, seja capaz de estabelecer maiores índices de plasticidade sináptica e resistência a ruídos, tornando o sistema neural mais robusto, conectivo, energeticamente econômico e tolerante a falhas.

Figura 4 - Modelo de neurônio memristivo de dióxido de vanádio com codificação de impulsos PRBS-PWM

5.1 Codificação de impulsos PRBS-PWM

A Figura 4 ilustra o modelo de neurônio proposto que, a princípio, estaria presente na camada de entrada de uma RNA pulsada, em topologia feedforward, recebendo como input duplas de sequências de sinais analógicos X_{NA} e X_{NB}, com variados graus de ortogonalidade, que, inicialmente, são convertidas em valores binários através da codificação PRBS.

A codificação PRBS representa um padrão de geração de sequências binárias, regularmente utilizado em aplicações para telecomunicações e encriptação, que almeja produzir sinais de saída, estatisticamente, semelhantes a sequências binárias puramente aleatórias (MACWILLIAMS e SLOANE, 1976; SPINNLER e XIE, 2007). Apesar de a codificação PRBS ser determinística e estabelecida a partir de um algoritmo computacional definido, devido à alta complexidade de sua geração, o resultado da mesma é de difícil predição e, consequentemente, considerado “pseudoaleatório” (MACWILLIAMS e SLOANE, 1976).

No modelo proposto, a codificação PRBS objetiva proporcionar, além de um sólido padrão sequencial para os sinais de entrada, também uma maior robustez a

ruídos, considerando que é esperado que exista um baixo grau de correlação entre as sequências codificadas e os potenciais ruídos em um cenário não-determinístico.

Posteriormente, o operador lógico XNOR apresenta a função de mensurar o grau de correlação entre uma dupla de sequências de entrada. Realizando uma operação bitwise, esta porta lógica determina que quanto maior a correlação entre as sequências binárias, maior será a potência do sinal a ser emitido e, caso as sequências sejam completamente ortogonais, o resultado será nulo e proporcionará um acréscimo no nível de eficiência energética para com o neurônio e, consequentemente, para com a RNA.

Os pesos sinápticos Wk_n do neurônio são aplicados por portas AND que realizam multiplicações binárias entre as saídas das portas XNOR e determinados sinais de tensão modulados por variáveis duty cycles de PWM. A técnica de PWM, empregada no modelo de neurônio proposto, tem o papel de regular as larguras dos pulsos de ondas quadradas que controlam a potência dos sinais que representam os pesos a serem multiplicados pela correlação das sequências binárias resultantes da operação lógica de coincidência (XNOR).

Esta proposta de mecânica de pré-processamento neural, potencialmente, acarretará na redução do custo energético de operações computacionais realizadas pela RNA, observando-se que caso as entradas de um determinado neurônio sejam, integralmente, não-correlaciondas, nenhum processamento será realizado e o neurônio permanecerá em repouso aguardando novas excitações.

5.2 Memristência e ativaçaõ do neurônio de dióxido de vanádio (VO_2)

No modelo de neurônio proposto, e evidenciado pela Figura 4, após a aplicação dos pesos sinápticos Wk_n, é realizada uma combinação linear das sequências de entrada que resultam no somatório V_0 demonstrado em (2).

$$V_0 = \sum (X_{NA} \odot X_{NB}) \wedge Wk_n \qquad (2)$$

O valor de V_0, por sua vez, é incorporado ao valor de entrada da tensão V, como retratado em (3).

$$V = V \times V_0 \qquad (3)$$

Almejando obter um maior nível de memristência quando aplicado a uma RNA, o modelo de neurônio proposto utiliza das características intrínsecas de transição de fase de estado sólido do composto inorgânico VO_2 quando apresentado em forma de filme de fino (ALMEIDA, 2003).

Esta transição de fase do filme fino de VO_2 é instigada por variações de temperatura e modifica, significativamente, as propriedades elétricas e cristalográficas do composto, alterando sua qualidade de semicondutor para metal e, consequentemente, seu sistema cristalino tetragonal para monoclínico,

caracterizando uma transformação de fase de primeira ordem (ALMEIDA, 2003).

$$C\frac{dT}{dt} = \frac{V^2}{R(t)} - G(T - T_s) \qquad (4)$$

$$C\frac{dT}{dt} = I^2 R(t) - G(T - T_s) \qquad (5)$$

A Equação (4) resulta no valor da capacitância térmica *C*, sendo esta apresentada em forma da taxa de variação da temperatura *T* em relação ao tempo *t*, que é calculada com base na diferença entre o valor da condutância térmica *G* e a relação de dependência entre o valor da tensão de polarização V^2 e a resistência elétrica em relação ao tempo *R(t)* (ALMEIDA, 2003). Ainda na mesma equação, a condutância térmica *G* reflete a perda de calor entre a temperatura do filme *T* e a temperatura do substrato T_s. É constatado, experimentalmente, que uma curva característica *R*X*T*, quando em transição de fase semicondutor-metal, sempre produz fenômenos histeréticos (ALMEIDA, 2003). Neste trabalho, as dinâmicas histeréticas reproduzidas pela evolução da fração volumétrica dos microcristais do filme fino de VO_2, em função da temperatura, são descritas baseando-se no modelo L^2P (Limiting Loop Proximity) (ALMEIDA, 2003).

A partir da Equação (4), é possível inferir também que, quando apresentada em termos de tensão, a região crítica das dinâmicas histeréticas reproduzidas pelo filme fino de VO_2 é muito mais sensível do que quando a mesma se encontra em termos de corrente, como evidenciado em (5), considerando que no caso da aplicação de tensão, a relação de dependência entre potência e resistência é inversamente proporcional, enquanto para a corrente, o seu valor aumenta o quadrado vezes a resistência, proporcionando um comportamento muito mais linear.

$$T = \frac{1}{C}\int \left[\frac{V^2}{R(t)} - G(T - T_s)\right] dt \qquad (6)$$

A função de ativação do modelo de neurônio proposto, descrita em (4), está associada à taxa de variação da capacitância térmica *C* que quando alcança um valor pré-determinado de resistência elétrica, em relação ao tempo, aufere o valor do limiar de ativação μ, e efetua o disparo do neurônio, evidenciado pela saída *y*. A Equação (6), por sua vez, descreve a integração térmica das entradas que resultam na temperatura *T* de entrada da função de threshold do neurônio.

6 I METODOLOGIA E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Com intuito de validar o modelo proposto, foi desenvolvido um script, utilizando o software interativo MATLAB, que, a partir de parâmetros pré-definidos e variadas entradas de tensão e duty cycles de PWM, emula o comportamento dinâmico descrito

em (4) e possibilita a averiguação de diversos cenários que acarretam, ou não, no disparo do neurônio.

Almejando adquirir resultados mais acurados na obtenção de soluções numéricas para a Equação (4), foi implementada uma versão built in do método Runge-Kutta de 4ª Ordem, ou RK4.

Figura 5 - Resultados das simulações com tensões variáveis [10V, 20V, 30V, 40V e 50V], duty cycles de 10% e 40% de PWM e um acréscimo de uma taxa de 40% de ortogonalidade entre as sequências de entrada

Na Figura 5, o valor do limiar de ativação μ está fixado na resistência elétrica de $7.3x10^4\ \Omega$ e foi acrescentada uma taxa de 40% de ortogonalidade, ou não-correlação, às sequências binárias pré-sinápticas de entrada. Como previsto na concepção da ativação do neurônio proposto, e demonstrado em (4), valores maiores de tensão apresentam uma maior sensibilidade de ativação, portanto, focando-se exclusivamente no comportamento do sistema quando excitado com uma tensão de 40V, modulado por um duty cycle de 10% de PWM e com o acréscimo de uma taxa de 40% de ortogonalidade entre as sequências de entrada, nota-se que a ativação ocorre em um tempo um pouco superior a 500ms e, sob as mesmas condições de potência e taxa de ortogonalidade, porém com um duty cycle de 40% de PWM, a ativação ocorre em menos de 100ms. Tal averiguação salienta o mérito da regulagem das larguras dos pulsos de ondas quadradas na ativação do neurônio e demonstra que um cenário com uma modulação PWM de menor potência oferece um controle mais robusto para com eventuais disparos.

Figura 6 - Resultado das simulações com tensões variáveis [10V, 20V, 30V, 40V e 50V], duty cycle de 10% de PWM e um acréscimo de uma taxa de 98% de ortogonalidade entre as sequências de entrada

A Figura 6 representa uma conjuntura com condições iniciais semelhantes as da Figura 5, porém com a adição de uma taxa de 98% de ortogonalidade entre as sequências de entrada e um maior intervalo de tempo de execução. Nota-se que quando as sequências de entrada são acrescidas com uma taxa de ortogonalidade próxima de 100% e, novamente, focando-se exclusivamente no comportamento do sistema quando excitado com uma tensão de 40V e modulado por um duty cycle de 10% de PWM, é possível verificar que mesmo em um intervalo de tempo muito superior, neste caso, de 1600ms, o neurônio nunca é ativado. Esta constatação evidencia o notável papel do modelo proposto na redução do custo energético de operações computacionais dentro de uma RNA, considerando que quanto menor a correlação entre as sequências de entrada, maior será o período de repouso do neurônio.

7 I CONCLUSÕES

Este trabalho, respaldando-se nos conceitos apresentados em seu encetamento, asseverou a relevância e robustez do modelo de neurônio proposto para com o principal desígnio da computação neuromórfica: A economia energética.

As simulações computacionais realizadas demonstraram que a aplicação da codificação de impulsos PRBS-PWM, em conjunto com um acurado controle de taxas de ortogonalidade entre as sequências de entrada, fazem com que este modelo de neurônio, ativado a partir da taxa de variação da capacitância térmica do composto inorgânico dióxido de vanádio, seja uma eficiente alternativa para, futuramente, estruturar redes neurais pulsadas mais energeticamente eficientes, vigorosas,

conectivas, tolerante a falhas e que proporcionem um maior nível de plasticidade neural.

Em trabalhos futuros, serão analisados, mais profundamente, os resultados e o comportamento de simulações computacionais utilizando de excitações com variadas entradas de tensão, corrente elétrica e taxas de ortogonalidade. Almeja-se também o projeto de um software simulador, a ser desenvolvido em uma linguagem orientada a objetos, que seja capaz de emular o completo funcionamento de uma RNA constituída por neurônios baseados no modelo proposto neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC) por viabilizar a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. A. L. **Modelo de histerese para transição semicondutor-metal em filmes finos de VO_2**. Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, 2003.

CHENG, Zengguang et al. **On-chip photonic synapse**. Science advances, v. 3, n. 9, p. e1700160, 2017.

DE OLIVEIRA, Claudia Eunice Neves; SALINA, Maria Elisabete; ANNUNCIATO, Nelson Francisco**.** **Fatores ambientais que influenciam a plasticidade do SNC**. Acta Fisiátrica, v. 8, n. 1, p. 6-13, 2001.

FERRARI, Elenice A. et al. **Plasticidade neural: relações com o comportamento e abordagens experimentais.** Psicologia: teoria e pesquisa, 2001.

GHOSH-DASTIDAR, Samanwoy; ADELI, Hojjat. **Spiking neural networks**. International journal of neural systems, v. 19, n. 04, p. 295-308, 2009.

HAYKIN, Simon. **Neural networks: a comprehensive foundation**. Prentice Hall PTR, 1994.

INDIVERI, Giacomo; CHICCA, Elisabetta; DOUGLAS, Rodney J. **Artificial cognitive systems: From VLSI networks of spiking neurons to neuromorphic cognition**. Cognitive Computation, v. 1, n. 2, p. 119-127, 2009.

JO, Sung Hyun et al. **Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems**. Nano letters, v. 10, n. 4, p. 1297-1301, 2010.

KUMAR, Ankit; MOHANTY, Pritiraj. **Autoassociative memory and pattern recognition in micromechanical oscillator network**. Scientific reports, v. 7, n. 1, p. 411, 2017.

MAASS, Wolfgang. **Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models**. Neural networks, v. 10, n. 9, p. 1659-1671, 1997.

MACWILLIAMS, F. Jessie; SLOANE, Neil JA. **Pseudo-random sequences and arrays**. Proceedings of the IEEE, v. 64, n. 12, p. 1715-1729, 1976.

MCCULLOCH, Warren S.; PITTS, Walter. **A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity**. The bulletin of mathematical biophysics, v. 5, n. 4, p. 115-133, 1943.

MEAD, Carver. **Neuromorphic electronic systems**. Proceedings of the IEEE, v. 78, n. 10, p. 1629-1636, 1990.

MERKEL, Cory et al. **Neuromemristive systems: Boosting efficiency through brain-inspired computing**. Computer, v. 49, n. 10, p. 56-64, 2016.

RAUBER, Thomas Walter. **Redes neurais artificiais**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

SPINNLER, B.; XIE, C**. Performance assessment of DQPSK using pseudo-random quaternary sequences**. In: 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication. VDE, 2007. p. 1-2.

SPORNS, Olaf; TONONI, Giulio; KÖTTER, Rolf. **The human connectome: a structural description of the human brain**. PLoS computational biology, v. 1, n. 4, p. e42, 2005.

TSODYKS, Misha; PAWELZIK, Klaus; MARKRAM, Henry. **Neural networks with dynamic synapses**. Neural computation, v. 10, n. 4, p. 821-835, 1998.

WALDROP, M. Mitchell. **The chips are down for Moore's law**. Nature News, v. 530, n. 7589, p. 144, 2016.

WRIGHT, C. David; HOSSEINI, Peiman; DIOSDADO, Jorge A. Vazquez. **Beyond von-Neumann computing with nanoscale phase-change memory devices**. Advanced Functional Materials, v. 23, n. 18, p. 2248-2254, 2013.

XIA, Lixue et al. **MNSIM: Simulation platform for memristor-based neuromorphic computing system**. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, v. 37, n. 5, p. 1009-1022, 2017.

CAPÍTULO 16

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

Data de aceite: 17/03/2020

Data de Submissão: 03/12/2019

Lorenna Maria Figueiredo Albuquerque
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/5766723780281448

Kayon Vinícius Lima Lopes
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/5491416686458487

Orlando Donato Rocha Filho
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/7455720877184126

Danúbia Soares Pires
Instituto Federal do Maranhão, Departamento de Eletroeletrônica.
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/4739495583287970

RESUMO: Durante a primeira década do século XXI, houve uma ascensão no conceito de sistemas computacionais. Sucedeu-se então um crescente avanço no desempenho e flexibilidade da efetivação em tempo-real de sistemas de automação industrial. Contudo, existiu a necessidade de desenvolvimento de projetos sustentáveis, visando o melhor gerenciamento dos recursos naturais. O intuito principal é que o gerenciamento hídrico residencial de forma fácil e de baixo custo promova ao consumidor uma conscientização pela economia de água no seu dia a dia. A construção do sistema é baseado em um controlador MISO nebuloso que foi desenvolvido através de um software de modelagem e simulação, o qual acarretará no controle de uma válvula proporcional, que possibilitará a saída de água conforme a demanda do ambiente e o relatório do seu consumo diário.

PALAVRAS-CHAVE: Controle nebuloso; Lógica nebulosa; Controle de vazão hídrica; Válvula proporcional; Sustentabilidade.

FUZZY MISO MODEL WITH MAMDANI STRUCTURE APPLIED TO WATER FLOW ANALYSIS AND CONTROL

ABSTRACT: During the first decade of the 21st century, there was a rise in the concept of computational systems. A growing advance in the performance and flexibility of the real-time effectivity of industrial automation systems was succeeded. However, there was a need to develop sustainable projects, aiming at better management of natural resources. The main goal is that residential water management in an

easy and inexpensive way promotes the consumer an awareness of the water economy in their daily life. The construction of the system is based on a fuzzy MIMO controller that was developed through a modeling and simulation software, which will lead to the control of a proportional valve, which will enable water output according to the demand of the environment and the Daily consumption report.
KEYWORDS: Fuzzy control; Fuzzy Logic; Water flow control; Proportional valve; Sustainability.

1 I INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle proporcionam a uma determinada interface de entrada a solução para o seu problema específico de forma inteligente. A operação de sistemas inteligentes é associada a analogias com sistemas biológicos. A capacidade dos seres humanos em se adaptar de forma imprecisa às tomadas de decisões se diverge da possibilidade de solução das máquinas, devido ao fato de que seu raciocínio é preciso e binário. A retirada de tal restrição proporcionaria às máquinas e aos computadores a capacidade de raciocínio adaptativo, como os seres humanos. Portanto, os sistemas de controle trabalham com o processo a ser controlado e com a relação entre a entrada e saída do sistema (Shaw e Simões, 1999).

Com isso, os sistemas de controle são utilizados há muito tempo em diversas áreas, devido à sua capacidade em proporcionar uma melhor aquisição de dados e operações eficientes e, como consequência, o ganho de tempo e recursos otimizados em processos complexos ou simples (Lima e Pires, 2017). Com o aumento populacional ano após ano, a sociedade vem se desenvolvendo de uma maneira que gera impactos negativos ao meio ambiente. Como consequência, o termo sustentabilidade está sendo objeto de estudo no âmbito mundial para o desenvolvimento de sistemas que utilizam os recursos naturais de maneira inteligente (Gomes e Pereira, 2018). Portanto, há um crescente ramo na comunidade científica que busca o desenvolvimento de sistemas de controle que proporcionam a otimização dos recursos naturais.

Na Europa e na Ásia, diversos fabricantes adotaram a solução de controladores nebulosos em seus CLP's (Controlador Lógico Programável), empresas tais como AEG™, Siemens AG™, assim como outras. Testes foram realizados para a comprovação da eficiência de um controlador nebuloso, dentre esses, destaca-se a avaliação de um estimador de parâmetro em um sistema de freio tipo ABS que foi implementado com um bloco funcional nebuloso, o qual apresentou um menor tempo para o ciclo computacional se comparando a outros testes. Dessa forma, pode-se comprovar o uso do algoritmo nebuloso na maioria dos sistemas industriais (Shaw e Simões, 2007). Com isso, a realidade do desenvolvimento de um controlador

nebuloso voltado à sustentabilidade é algo exequível e está cada vez mais acessível a um grande universo de usuários, devido, também, à facilidade em aquisição de dispositivos de baixo custo (Deboni et al., 2011).

2 I JUSTIFICATIVA

A lógica clássica de Aristóteles fez do atributo da bivalência um marco histórico em nossa cultura ocidental. Naquela época, uma determinada informação só poderia se comportar de dois modos: falso ou verdadeiro. Não existia nada entre ambas, o meio era excluído. Entretanto, há um descompasso entre o mundo real e a nossa visão bivalente do mesmo. O mundo real é analógico, e não digital (Simões e Shaw, 2007). Uma forma de trabalharmos os diversos graus de "verdade" é através da Lógica Nebulosa.

Os sistemas nebulosos são sistemas a serem definidos com precisão e o controlador nebuloso é um tipo especial de controle não-linear que também será definido com precisão. Embora os fenômenos que a teoria dos sistemas nebulosos caracteriza possam ser difusos, a teoria em si é precisa. Assim, torna-se eficaz o seu uso para o desenvolvimento de sistemas sem linearidade.

Observa-se que grande parte dos sistemas utilizados para controle de vazão hídrica são voltados para a eficiência. Em (Oliveira et al., 2016) é apresentada uma abordagem para otimização do uso hídrico residencial, a qual mede o consumo de água baseado nas estatísticas feitas pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS e promove uma saída baseada nas regras de inferência nebulosa para que o usuário possua um melhor aproveitamento do seu recurso.

Em (Profissional et al., 2014) foi desenvolvido um protótipo de hidrômetro digital para a captação do consumo residencial de água que disponibilizou ao usuário a exibição dos dados através de gráficos em dispositivos móveis. Apesar de serem eficientes, esses sistemas não são capazes de controlar a vazão hídrica que deverá ser fornecida ao ambiente através de informações como a média do consumo diário, vazão, período e dias da semana.

O sistema MISO inteligente nebuloso para análise e controle de vazão hídrica apresentado neste artigo tem como objetivo desenvolver um controlador nebuloso que será responsável pelo controle da vazão hídrica através da construção de uma válvula proporcional de baixo custo que proporcionará ao usuário um sistema capaz de tomar decisões de forma inteligente.

3 I METODOLOGIA

3.1 sistema miso nebuloso

Os sistemas MISO (múltiplas entradas e uma única saída, do inglês, *multiple input and single output*), devem ser considerados no projeto de controle, em sistemas onde há interação de diversas entradas e uma única saída. No primeiro momento foi realizado um estudo sobre como as variáveis influenciam o sistema. A partir deste estudo, os conjuntos nebulosos foram definidos e as regras do sistema nebuloso Mamdani foram estabelecidas.

Na execução do sistema, foi utilizada a plataforma *Arduino* para a aquisição de dados e operação do sistema. O *Arduino* que é uma plataforma de desenvolvimento de sistemas embarcados de baixo custo e *open source* (Oliveira, 2017) ele foi desenvolvido para tornar mais acessível a utilização da eletrônica em projetos multidisciplinares. Sua programação é realizada em C e existem diversos modelos disponíveis no mercado (Grosskopf e Pykosz, 2017).

Para a aquisição de uma das variáveis de entrada (vazão) foi utilizado um circuito usando dispositivos eletrônicos e o *Arduino* Mega. Logo após, os conjuntos nebulosos da variável foram gerados. As aquisições dos dados de vazão foram obtidas através de um sensor de fluxo YF-S201 - sensor que possui uma válvula em formato de catavento com um imã conectado que opera em conjunto com um sensor hall para enviar um sinal PWM. O sensor é ligado a entrada digital do *Arduino*, que faz o processamento do dado recebido pelo sensor. As informações são enviadas a um servidor via *Wi-fi*, as quais foram armazenadas em um banco de dados.

O domínio da variável período é realizado através do módulo RTC (*Real Time Clock*) DS1307. Esse módulo possui 56 bytes de memória não - volátil disponível para uso, arquiva e disponibiliza informações completas de data como dia da semana, dia do mês, mês, ano, horas, minutos e segundos. Este módulo também fornece o ajuste automático para meses com 31 dias e anos bissextos.

Para a construção da válvula proporcional foi utilizado um servomotor Tower Pro MG995, seu torque é apto para movimentar a haste da válvula, suas engrenagens de metal fornecem mais robustez do que engrenagens de plástico. As especificações do servomotor, estão apresentadas na tabela 1.

O registro tipo esfera com alavanca e bitola 3/8” também foi utilizado para a construção da válvula proporcional, representada na figura 1. O registro controla a vazão que passa internamente por meio de obturador esférico. Quando a abertura do obturador e o eixo da vazão correspondem, obtém-se a vazão máxima. Do mesmo modo, quando o eixo de abertura é perpendicular à tubulação, o registro encontra-se totalmente fechado. A abertura do registro e a vazão podem ser estabelecidos muito precisamente. Este tipo de registro permite pequenas alterações na passagem de

água proporcionando a possibilidade de mais estados além de totalmente aberto ou totalmente fechado, ou seja, ideal para o controle proporcional.

Características	Valor Especificado
Torque	13kg.cm (4.8V) ou 15kg.cm (6V)
Velocidade de operação	0,17s/60° (4.8V) ou 0,13s/60° (6V)
Tensão de operação	4.8V - 7.2V
Tipo de engrenagem	Engrenagem de metal

Tabela 1. Especificações Servo motor Tower Pro MG995.

Na figura 2 observam-se os componentes utilizados na montagem do circuito: (i) *Arduino* MEGA; (ii) Espigão Macho; (iii) Sensor de Fluxo YF-S201; (iv) módulo RTC; (v) Registro tipo esfera; (vi) Servomotor MG995; (vii) módulo ESP8266. Resistores foram utilizados para a adequação de tensão e corrente.

3.2 Conjuntos nebulosos

A vazão de água e o período do dia foram selecionados como variáveis de entrada; realizou-se um estudo de como estas variáveis influenciam o sistema de tomada de decisão. Logo após, os conjuntos nebulosos e regras do sistema nebuloso Mamdani foram estabelecidos. A i-ésima regra do sistema nebuloso é definida a partir da expressão, dada a seguir na equação 1.

$$R^{(i)} = SE\ x_1\ \text{É}\ A_i^{j*}\ E \ldots E\ x_n\ \text{É}\ A_i^{j*}\ ENTÃO\ Y_1\ \text{É}\ B_1^{m*}\ E \ldots E\ Y_n\ \text{É}\ B_n^{m*} \quad (1)$$

onde $x_1, \ldots, n$ corresponde às variáveis linguísticas (as variáveis definidas como entradas) do antecedente da regra nebulosa; A_i^{j*} corresponde às partições nebulosas das variáveis linguísticas; y é a saída do modelo Mamdani, representada pela partição nebulosa B_n^{m*}. O método de defuzzificação utilizado foi o do centro de gravidade ou centroide, definido pela equação 2.

$$y^* = \frac{\sum_{m=1}^{N_y} y_m \mu_0(y_m)}{\sum_{m=1}^{N_y} \mu_0(y_m)} \quad (2)$$

onde y_m é o valor central da regra m e N_y corresponde ao número de regras do sistema nebuloso. Definida a partição do universo de discurso de cada variável

em conjuntos nebulosos, foram obtidas as regras nebulosas.

Figura 1. Registro tipo esfera.

Figura 2. Componentes usados.

Os conjuntos nebulosos para cada variável linguística do sistema podem ser observados nas figuras 3, 4 e 5, respectivamente.

Figura 3. Funções de pertinência para a variável Vazão.

Figura 4. Funções de pertinência para a variável Período.

Figura 5. Funções de pertinência para a variável Abertura.

A vazão é essencial para o gerenciamento hídrico, pois por meio desta variável pode-se determinar o quantitativo hídrico utilizado em um certo período. Para a definição do limite superior e inferior do universo de discurso da variável, os valores considerados, máximos e mínimos, são os valores aceitáveis para a regulação do sensor. Os conjuntos nebulosos para esta variável linguística se encontram na tabela 2, a unidade de medida usada foi l/min.

Conjunto	Suporte
Baixa	$0 < x < 12$
Média	$3 < x < 26$
Alta	$18 < x < 30$

Tabela 2. Variável Vazão (x)

O horário torna-se importante devido a possibilidade de destacar os intervalos no qual o consumo se torna excessivo. O horário foi definido como a variável Período, pois, deste modo, podemos torná-la uma variável nebulosa. A variável foi definida em seis conjuntos descritos em horas do dia, conforme a tabela 3.

Conjunto	Suporte
N1	$0 < x < 4$
N2	$3 < x < 8$
N3	$7 < x < 13$
N4	$11 < x < 17$
N5	$15 < x < 22$
N6	$19 < x < 24$

Tabela 3. Variável Período (x)

E por fim, para a variável de abertura da válvula, foram definidos três conjuntos nebulosos, a seguir na tabela 4, os conjuntos são descritos. A definição dos limites inferiores e superiores estão de acordo com o ângulo que o registro se movimenta.

Conjunto	Suporte
Pequena	$0 < x < 36$
Média	$9 < x < 81$
Grande	$54 < x < 90$

Tabela 4. Variável Abertura (x)

3.3 obtenção de regras nebulosas

Logo após a escolha das variáveis de entrada e saída, os conjuntos nebulosos foram definidos e, por conseguinte, as regras baseadas no conhecimento prévio da

aplicação do sistema. Foram definidas dezoito regras que se encontram listadas na tabela 5.

	Regras Utilizadas
1	Se o período é N1 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
2	Se o período é N1 e a vazão é média, então a abertura da válvula é pequena.
3	Se o período é N1 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é pequena.
4	Se o período é N2 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
5	Se o período é N2 e a vazão é média, então a abertura da válvula é mediana.
6	Se o período é N2 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é grande.
7	Se o período é N3 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
8	Se o período é N3 e a vazão é média, então a abertura da válvula é mediana.
9	Se o período é N3 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é mediana.
10	Se o período é N4 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
11	Se o período é N4 e a vazão é média, então a abertura da válvula é mediana.
12	Se o período é N4 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é mediana.
13	Se o período é N5 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
14	Se o período é N5 e a vazão é média, então a abertura da válvula é mediana.
15	Se o período é N5 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é grande.
16	Se o período é N6 e a vazão é baixa, então a abertura da válvula é pequena.
17	Se o período é N6 e a vazão é média, então a abertura da válvula é mediana.
18	Se o período é N6 e a vazão é alta, então a abertura da válvula é mediana.

Tabela 5. Base de regras do sistema proposto.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

O controlador baseado no sistema MISO nebuloso foi implementado na placa, em seguida realizou-se testes para verificar a aferição dos dados e a inferência do sistema. Resultados preliminares sugerem um melhor desempenho do sistema nebuloso em relação a um sistema totalmente aberto ou fechado. Observa-se que o sistema exige uma grande abertura quando temos um consumo excessivo, que são caracterizados pelo período em que os consumidores estão em maior quantidade usando água para necessidades pessoais e residenciais, geralmente o período de maior consumo são os períodos que os usuários estão no processo de saída ou chegada para o local de trabalho ou de estudo. Os intervalos de cada parâmetro podem mudar de acordo com o local onde o sistema poderá ser empregado, juntamente com suas variações máximas e mínimas das variáveis.

Na figura 6, a superfície (abertura da válvula em função a vazão e o período) é mostrada. Observa-se que o maior ângulo de abertura da válvula é nos períodos de pico. O usuário terá abertura total da válvula no período de maior consumo, porém,

a válvula se ajustará de acordo com as necessidades do ambiente. Desta forma, evita-se o consumo excessivo e promove ao usuário uma forma de otimização do seu recurso natural.

Figura 6. Curva de superfície para a variável Abertura.

Na figura 7 é mostrado o servomotor acoplado ao registo tipo esfera, formando a válvula proporcional. Logo após, este dispositivo foi fixado a uma placa MDF, usamos uma placa de MDF como um suporte para a válvula proporcional, podendo assim ter a possibilidade de realizar as demais ligações necessárias para o funcionamento do protótipo.

Figura 7. Válvula Proporcional.

Na figura 8, encontra-se o fluxograma do sistema proposto.

Figura 8. Válvula. Fluxograma do sistema proposto.

5 I CONCLUSÕES

Uma parcela significativa dos gastos em relação ao consumo hídrico deve-se pelo uso de forma não eficiente da água. A não conscientização e o consumo não otimizado geram impactos negativos na sociedade e, consequentemente, o desperdício excessivo. Há um grande esforço científico em proporcionar meios de um desenvolvimento sustentável. Neste sentido, é exequível a produção de um sistema o qual poderá avaliar as possíveis variáveis que influenciam o ambiente, gerando assim o auxílio para tomadas de decisões eficientes. O controle e o gerenciamento da vazão através da válvula proporcional foram implementados através da plataforma *Arduíno* para aquisição de dados e controle em tempo real. Destarte, o sistema foi executado como o esperado, armazenando os dados de entrada e saída e proporcionando ao usuário uma visão geral sobre seu consumo hídrico e o controle através da válvula proporcional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Bolsas Institucional do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - Campus Monte Castelo e a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

DE OLIVEIRA, Sérgio. **Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. Novatec Editora, 2017.

DEBONI, Mariana Loureiro; DE ALVAREZ, Cristina Engel; BISSOLI, Márcia. **Automação sustentável: uma nova visão do emprego de tecnologias na construção civil.**

GOMES, Adler Lucian Torres; DA COSTA PEREIRA, Fábio Sérgio. **AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL SUSTENTÁVEL.** REVISTA UNI-RN, v. 18, n. 1/2, p. 29, 2018.

GROSSKOPF, Pedro; PYKOSZ, Leandro Correa. **Controlando o consumo de água através da Internet utilizando Arduino.** In: Congresso Nacional de Inovação e Tecnologia. 2017.

LIMA, Fabrício S.; PIRES, Danúbia S. **Sistema Miso Inteligente para Controle de Iluminação**. In: Simpósio de Brasileiro de Automação Inteligente. 2017.

DE OLIVEIRA PINO, Alessandro Muras et al. **Sistema Inteligente Baseado em Regras de Inferência Fuzzy para Eficiência Hídrica Doméstica**.

PROFISSIONAL, DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E. EDUCAÇÃO et al. **Sistema de Monitoramento de Consumo de Água Doméstico com a Utilização de um Hidrômetro Digital.** 2014.

SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. **Controle e modelagem fuzzy**. 1999.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. Editora Blucher, 2007.

CAPÍTULO 17

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

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 08/01/2020

Mateus Gomes Binatti
Universidade Presbiteriana Mackenzie – FCI
São Paulo – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/0526570198803361

Marcos Venicios Conceição de Araújo
Universidade Presbiteriana Mackenzie – PPGEEC
São Paulo – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/2560715841923487[1]

Pollyana Coelho da Silva Notargiacomo
Universidade Presbiteriana Mackenzie – FCI/PPGEEC
São Paulo – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/5131975026612008

RESUMO: No âmbito dos jogos digitais há games que, além de entreter o jogador, se voltam à educação a respeito de determinados tópicos (sociais, pessoais ou profissionais). Estes são denominados de *serious game*, sendo que para fazer com que o jogador aproveite ao máximo a experiência e não abandone a proposta antes do tempo previsto certas questões devem ser colocadas em pauta. Uma delas é estudar a forma com a qual o jogador se relaciona com o jogo e como esse contato tem impacto no mesmo, aspectos abordados pela engenharia cognitiva. A partir disso, foi criado um sistema especialista que avalia, com base na aderência às afirmações fornecidas ao jogador em escala de Likert, as questões relacionadas à engenharia cognitiva presentes em *serious games*. O sistema especialista SE-ECSG (Sistema Especialista Engenharia Cognitiva de *Serious Game*) constitui um modelo para avaliar *serious games* divididos em três áreas (tarefas, premiações e jogabilidade) e sugerir melhorias no mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: sistema especialista, engenharia cognitiva, *serious game*.

EXPERT SYSTEM FOR SERIOUS GAMES COGNITIVE ENGINEERING ASSESSMENT

ABSTRACT: In the context of digital games there are games in addition to entertaining the player, are focused on education in a specific topic (social, personal or professional). These are called serious game, and in order to make the player to take full advantage and not abandon the proposal before the scheduled time, certain issues should be put at stake. One is to study how the player relates to the game and how this contact has impact on himself, issues covered by cognitive engineering. Based on that, an expert system was created that measures, based on adherence to the information provided to the player in the Likert's scale, the cognitive

1 Este capítulo foi originalmente publicado como artigo no SBGames 2019.

engineering issues present in serious games. The Expert System SE-ECSG is a model for measuring serious games divided into three areas (tasks, awards and gameplay) and suggesting improvements in it.
KEYWORDS: expert system, cognitive engineering, serious game.

1 I INTRODUÇÃO

Um jogo é uma atividade voluntária, estando presente há muito tempo no cotidiano dos seres vivos, sejam eles humanos ou até mesmo animais. Jogos possuem suas próprias regras, muitas vezes distintas do mundo real, as quais devem ser aceitas por todos os participantes. O jogo tem uma realidade autônoma, a qual está além da esfera da vida humana, pois isso forçaria uma limitação em sua proposta [1]. Inclusive, existem o que são denominados “Jogos Digitais”, que têm seu ambiente emulado por computadores ou até mesmo videogames. Nestes, o computador pode atuar como um adversário para o jogador, árbitro, colaborador ou apenas fornece os gráficos e animações.

Dentre os jogos digitais, existem os serious games: categorizados como ferramentas que podem ser utilizadas como material de ensino com o objetivo de educar. Ação essa que não se limita às escolas ou universidades, também podendo ser utilizada quando se deseja ensinar um novo colaborador em ambiente corporativo ou em um cenário de resgate como, por exemplo, a aplicação de um treinamento de incêndio para bombeiros recém chegados na brigada [2].

Quando se constrói um serious game existe um fator fundamental concernente ao balanceamento para o estabelecimento do equilíbrio entre a diversão que o jogo oferece (entretenimento) e a educação abordada [3]. Os autores inclusive ressaltam que caso o serious game veicule um conceito de forma massiva sem equiparar os elementos visuais e conceituais, a informação será explorada de forma desproporcional ao design, forçando diálogos de texto entre o jogador e o universo inseridos de forma demasiada. Outro caso semelhante diz respeito ao trabalho com o conteúdo educacional de forma repetitiva, o que pode resultar numa experiência não aprazível para o estudante-usuário, fazendo com que ele desista do processo e não absorva o conteúdo esperado. Da mesma forma, se o jogo for desenvolvido com foco predominante no entretenimento, o usuário pode se ater ao passatempo e não absorver o conhecimento.

Tendo em vista o que foi apresentado, cabe conceituar a engenharia cognitiva. Esta se propõe a estudar e entender qual impacto a ferramenta desenvolvida gera na pessoa que a está utilizando, especialmente no que se diz respeito ao seu pensamento e ações durante a interação [4]. A engenharia cognitiva surgiu na década de 80 para aplicar a psicologia cognitiva no âmbito computacional tratando do processo

de interação entre o usuário e o universo com o qual ele está se relacionando, pois "as mais sofisticadas máquinas são inúteis caso o homem não consiga utilizá-la de forma correta" [5, p. 138]. Neste sentido, a engenharia cognitiva se preocupa em analisar o cenário, o design do mesmo e a avaliação de sistemas complexos. Assim, abrange tanto as pessoas que vão utilizar quanto às tecnologias usadas na criação das ferramentas, combinando conhecimento, experiência, fatores humanos, design da interação humano-computador e a engenharia de sistemas. Finalmente, cabe ressaltar que a engenharia cognitiva tem foco centrado na cognição exigida nos ambientes de trabalho, e se preocupa com sistemas complexos, em que qualquer ação tomada pelo operador deve ser alinhada ao comportamento esperado.

Outro conceito relevante no contexto da presente pesquisa é o de sistema especialista. Este é desenvolvido com o intuito de resolver certos problemas computacionalmente, emulando o conhecimento e o mecanismo de raciocínio de um profissional com experiência e conhecimento reconhecidos em uma determinada área. Um sistema especialista é feito em duas etapas, sendo elas a base de conhecimento (de um especialista) e o motor de inferência para guardar o raciocínio do especialista em questão [6]. A base de conhecimento pode ser tanto derivada de diversos humanos, quanto de outros sistemas especialistas, os quais possuem sua própria base de conhecimento [7]. A ferramenta especialista é utilizada em várias áreas de atuação, sendo elas, por exemplo: pacientes com disgrafia [8], pacientes com problemas mentais [9] e elaboração de planos de ensino e atividades avaliativas [10].

Inclusive, destaca-se que a engenharia cognitiva aplica a psicologia no âmbito computacional, tratando da interação do usuário com o mundo com o qual ele se relaciona [11]. A partir deste pressuposto, o objetivo do presente trabalho consistiu em desenvolver um sistema especialista, baseado em afirmações que possibilitam avaliar, seja qual for o serious game, as questões e problemas envolvidos pela engenharia cognitiva. Para isso, foi elaborado um formulário ao qual se atribui determinado peso de aderência em relação a cada afirmação apresentada, para que o sistema calcule e apresente ao usuário se aquele o jogo em questão é ou não adequado do ponto de vista da engenharia cognitiva.

2 I TRABALHOS RELACIONADOS

Não foram encontrados trabalhos estrita e diretamente relacionados ao tema de pesquisa, ou seja, ao uso de sistemas especialistas para a avaliação de serious games do ponto de vista da engenharia cognitiva. Foram realizadas buscas nas bases Web of Science (WoS), Scopus, IEEE e ACM no período de junho de 2018 a junho 2019, sendo que os resultados apontaram projetos que possuem relações

tangenciais com a proposta, explorados a seguir.

A. Sistemas especialistas

Um primeiro exemplo de sistema especialista volta-se à análise e diagnóstico de crianças portadoras de disgrafia (trauma que envolve o uso incorreto de palavras, a criação de frases sem nexo, a incoerência na soletração de palavras etc.). Para isso se classifica o grau de aderência entre a criança e o trauma em quatro níveis, sendo eles: normal, disgrafia leve, disgrafia moderada e disgrafia severa. Uma das motivações para o desenvolvimento deste projeto é que nem todos os pais ou parentes têm a capacidade de identificar se uma criança possui disgrafia [8].

Outra proposta trata de uma ferramenta especialista para avaliar se um jogo apresenta meios para que o jogador vivencie, cada vez mais, o universo com o qual está se relacionando, fazendo com que o mesmo perca a noção do tempo real e sinta-se dentro daquele mundo em questão [12].

Inclusive, sistemas especialistas podem ser elaborados para quaisquer contextos, sendo que na presente pesquisa abarcaram a expertise envolvida na relação entre engenharia cognitiva e serious games, conforme detalhado a seguir.

B. Engenharia cognitiva

Uma das iniciativas científicas neste contexto refere-se à criação de um conjunto de heurísticas para avaliar jogos desenvolvidos para a plataforma móvel [13]. Entretanto, destaca-se que algumas destas diretrizes podem cumprir sua função independentemente da plataforma, dado que a avaliação foi dividida em três módulos: usabilidade de um jogo (que trata dos controles do jogo e a interface com a qual o jogador se relaciona), mobilidade (que cobre a interface do jogo) e Gameplay. Desta última foram retiradas heurísticas como, por exemplo, se “os termos apresentados condizem com o vocabulário do jogador”, em que o jogo deve tentar não utilizar palavras que o jogador não tem conhecimento ou, se o jogo contém siglas ou abreviações (estas devem conter seus significados em algum lugar de fácil acesso ao jogador para não atrapalhar a experiência).

Outro aspecto que pode ser abordado diz respeito à satisfação dos jogadores, sendo esta medida a partir da avaliação da diversão em um jogo digital [14]. Pode-se ressaltar, dentre as heurísticas presentes, se “o jogador pode salvar o progresso alcançado”, o que possibilita que o mesmo possa voltar a ter contato com a experiência proposta no momento de sua preferência.

Finalmente, cabe descrever a abordagem da revisão sistemática sobre engenharia cognitiva aplicada a sistemas críticos no âmbito da realidade virtual [15]. Esta buscou fazer um apanhado geral sobre o que já se havia estudado sobre este tema com foco na engenharia cognitiva. Ao final, foram levantados 25 heurísticas

a serem aplicadas neste âmbito com o objetivo de revisar os procedimentos em ambientes virtuais. Destaca-se que foi possível aproveitar a afirmação de que "o sistema apresenta feedback imediato para as ações do usuário (reconhecimento por rastreamento) sem requerer tempo adicional", pois é necessário mostrar ao jogador como o ambiente reage conforme ele toma decisões, no tempo certo, fazendo com que o mesmo não se sinta incomodado e descontente.

A partir do que foi apresentado é relevante também contextualizar a questão da área de aplicação: serious games.

C. Serious game

Animo Math [16] é um serious game voltado às crianças de cinco aos sete anos. Seu objetivo é reforçar a atenção dos jovens estudantes na matéria de matemática, sendo que eles escolhem o avatar que mais lhes representa. Assim, é possível escolher animais no estilo cartoon, com presença de cores e música, possibilitando uma experiência agradável aos jogadores.

O jogo Anime Math apresenta uma técnica de inteligência artificial na qual são monitorados a quantidade de acertos e erros das crianças para que, por meio do cálculo dessa taxa, o jogo possa adaptar à dificuldade das operações ao nível de habilidade das crianças, sendo que também o cenário do jogo é trocado para condizer com o tema. Quanto mais erros o jogador comete, mais escuro fica o cenário.

Já Sustain city [17] é uma série de serious game para o ambiente de realidade virtual, tendo sido desenvolvido com o objetivo de mostrar aos alunos de ensino médio a importância de ter a presença de cientistas, engenheiros ou matemáticos quando se fala sobre projetar e gerenciar uma cidade sustentável. No jogo Stability desta franquia o aluno visualiza a estrutura de pontes, avalia sua infraestrutura e explora meios de poder fortalecer suas condições com o objetivo de prolongar sua existência.

Já X-Dengue foi desenvolvido, utilizando a combinação de cenário 2D, realidade virtual, aumentada, e o mundo real, com o objetivo de educar sobre os perigos do vírus da dengue, as doenças que o mesmo pode trazer (vírus zika, chicungunha e febre amarela), bem como maneiras de combater o mosquito e cuidados a serem tomados. Desenvolvido por [18], o jogo retrata a história de "Pedrinho", um garoto que opta por entender e combater o mosquito Aedes Aegypy após seu amigo ser afetado por um dos vírus transmitidos pelo inseto.

3 I MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da presente pesquisa envolveu uma seré de etapas.

A. Primeira etapa

Esta englobou uma ampla revisão bibliográfica a respeito dos seguintes elementos: engenharia cognitiva [4], [11], [13], [14-15]; serious games [2-3], [16] e sistemas especialistas [6-7-8-9-10-11-12].

B. Segunda etapa

Com base na investigação a respeito das heurísticas foi montado um conjunto de diretrizes pertinentes à engenharia cognitiva em serious games (Quadro 1). Desta forma, as heurísticas elaboradas possibilitam aos usuários pensar a respeito dos serious games e verificar em que medida são ou não atendidas por estes; constituído um elemento fundamental para um sistema de inferência trabalhar.

Heurísticas	Área
Ao perceber que o jogador não está conseguindo progredir, o jogo oferece dicas ao jogador ou adapta a dificuldade dos desafios às habilidades do praticante (adaptatividade)	Tarefa
As tarefas designadas ao jogador, dentro do jogo, são de alta complexidade	Tarefa
O jogo apresenta tarefas repetitivas, acarretando em tédio	Tarefa
O jogo dá dicas para o jogador quando identifica que ele não consegue progredir com as tarefas	Tarefa
O jogador recebe prêmios ao realizar tarefa	Premiação
O jogador pode perder conquistas caso falhe nos desafios	Premiação
O sistema apresenta feedback imediato para as ações do usuário (reconhecimento por rastreamento) sem requerer tempo adicional.	Jogabilidade
Os termos apresentados condizem com o vocabulário do jogador	Jogabilidade
A área de interação entre o jogador e o ambiente (interface) o deixa confortável	Jogabilidade
O jogo em questão apresenta formas para que o jogador perca a noção do tempo externo enquanto participa da experiência	Jogabilidade
O jogo apresenta comandos complexos durante a experiência	Jogabilidade
O jogador pode alterar os comandos caso desejar	Jogabilidade
O jogo exige que o jogador memorize certas coisas (comandos, valores, sequências, formas de resolução) com certa frequência	Jogabilidade
O jogador pode salvar o progresso alcançado	Jogabilidade
O jogo é composto por um enredo atrativo	Jogabilidade
O jogo possui tutorial	Jogabilidade
O tutorial é cativante e possibilita aprender os comandos básicos para iniciar a experiência	Jogabilidade

Quadro 1: Relação das heurísticas por área

C. Terceira etapa

Pautou-se na modelagem do sistema.

D. Quarta etapa

Pautou-se na construção do sistema especialista. Como este foi desenvolvido para a plataforma Web, se utilizou a linguagem de marcação HTML5 para criação das páginas, CSS3 para estilização das mesmas, com alguns conceitos de ES6 tanto na construção da API quanto na construção do front-end (camada de visualização). Neste sentido, se levou em consideração quais navegadores dão suporte à tecnologia usada. Além das tecnologias apontadas anteriormente também se fez uso de JavaScript para poder atribuir funcionalidades às páginas e atuação do motor de inferência (como o expert da área resolveria tal problema). Isso implicou ainda no uso da plataforma Node.js para relacionamento com o banco de dados MySQL, o qual foi escolhido pelo suporte e facilidade que este possui para trabalhar com o Node.js e o framework Express.js para poder escolher quais páginas são montadas na tela do usuário e para a autenticação. Com este modelo, a API alimenta as páginas e também as fornece, na hora certa, para o cliente-usuário de forma dinâmica e, como resultado, se obteve o SE-ECSG (Sistema Especialista – Engenharia Cognitiva Serious Games).

Assim que o jogador termina de preencher o formulário e seleciona a opção de envio para análise, o genéri realiza os cálculos de inferência e encaminha um relatório ao desenvolvedor com o objetivo de sugerir possíveis melhorias em alguns aspectos do jogo em questão. Além disso é apresentada uma resposta em formato de texto e um gráfico com a relação das respostas enviadas pelo jogador (agrupadas pelos temas abordados), sendo que o fluxo do sistema se encontra detalhado na próxima seção.

4 I RESULTADOS

O resultado da investigação pode ser demonstrado por meio do funcionamento do SE-ECSG, que será trabalhado por meio de uma breve história.

Paulo, um jovem de 18 anos com o ensino médio recém concluído, demonstra interesse por estudar por meio de games e sonha em ser um desenvolvedor nesta área. Ao fazer buscas sobre este assunto se depara com os conceitos de Serious Game e especificamente com a proposta do SE- ECSG (Sistema Especialista - Engenharia Cognitiva Serious Game). Com a intenção de melhor entender a proposta do sistema e contribuir com um Game que havia conhecido recentemente, o Animo Math [16], decidiu jogar e relatar sua experiência. O Animo Math é um game lúdico para crianças que usa contas de adição e subtração, assumindo uma postura

compatível com o público alvo do game, Paulo jogou e coletou suas impressões. Em seguida acessou o SE-ECSG, registrou o Animo Math, e preencheu o formulário de heurísticas. A equipe do Animo Math recebeu o formulário emitido pelo SE-ECSG (Figura 1) e, com base nele, será capaz de tomar decisões para melhorar o jogo em questão.)

Relatório gerado pelo formulário de heurísticas

O motor de inferência gerou o seguinte relatório:

Apresentar, sempre, termos com os quais o jogador está familiarizado promove conforto, mas acaba fazendo com que o mesmo não se sinta desafiado a aprender novos termos. Seria uma boa hora para introduzir jargões da área, para que a criança se sinta mais familiarizada com a área em questão. Caso o jogo, particularmente, não apresente a necessidade de salvar o progresso alcançado, tudo bem! Entretanto, caso necessário, cabe revisar e avaliar pontos para que o jogador consiga salvar o progresso.

Adaptatividade é uma técnica muito nobre de ser usada e apreciada pelos pesquisadores, é considerado um ponto positivo caso o serious game abarque isso! Abarcar tarefas muito fáceis pode acabar deixando o nível de desafio muito baixo, vale a pena revisar caso não seja o real foco do jogo em questão, do contrário, é recomendado apenas uma revisão para garantir os conformes. O equilíbrio entre ganhar e perder algo conquistado é o essencial para um jogo!

Figura 1: Possível relatório

5 I CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi realizado um estudo sobre a engenharia cognitiva, responsável por tratar de aspectos de psicologia cognitiva em ambientes computacionais, bem como maneiras de implementar isso em jogos desenvolvidos com o objetivos ligados à educação em geral. Os parâmetros estudados possibilitaram desenvolver (e testar) a ferramenta especialista SE-ECSG. Este foi estruturado em JSON de maneira flexível para abarcar posteriormente novas heurísticas. Se obteve um sistema capaz de avaliar serious games sob a ótica da engenharia cognitiva a partir de um conjunto de dezessete heurísticas classificadas em Escala Likert (abarcando os temas de tarefas, premiações e jogabilidade).

Em trabalhos futuros se buscará acrescentar mais heurísticas para avaliação de serious games com o objetivo de analisar um jogo por outras abordagens e, até mesmo, gerar relatórios com maior gama de informações. Assim, em vez de tratar apenas de assuntos de engenharia cognitiva, pode-se desenvolver um conjunto de heurísticas para avaliar, por exemplo, aspectos de mensuração da aprendizagem e

sua adequação ao cenário proposto

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte e a infraestrutura, fornecidos pelo MackPesquisa e Laboratório JAS3.

REFERÊNCIAS

[1] J. Huizinga, **Homo Ludens.** São Paulo: Editora Perspectiva, 2000.

[2] R. Carvalho e L. Ishitani, "**Fatores motivacionais para desenvolvimento de mobile serious games com foco no público da terceira idade: uma revisão de literatura,**" ETD - Educação Temática Digital, 15(1), pp. 16-32.C. Franzwa et al., "Serious Game Design: Motivating Students through a Balance of Fun and Learning," 5th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES), Poole, 2013, pp. 1-7.

[3] F. Ritter, E. Baxter, D. Gordon, e E. F. Churchill, **Foundations for Designing User-Centered Systems**, London: Springer-Verlag, 2014.

[4] F. Karray et al., "**Human-Computer Interaction: Overview on State of the Art**," International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, v. 1, n. 1, 2008, pp. 137-159.

[5] D. S. Maylawati, W. Darmalaksana e M. A. Ramdhani, "**Systematic Design of Expert System Using Unified Modelling Language**," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 288 012047, 2018.

[6] P. Grogono et al., "**A Review of Expert Systems Evaluation Techniques**," AAAI Technical Report, AAAI Report WS-93-05, 1993.

[7] D. Kurniawan et al., "An Expert System for Diagnosing Dysgraphia," 2nd International Conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), 2017.

[8] V. Volkova et al., "**An Expert System for Evaluation of Human Mental Resources: Holistic and Developmental Approach**," Intelligent Systems Conference, 2017.

[9] H. Ferreira, "**TTOOL: Modelo para planejamento pedagógico e instrumentalização de professores no processo de ensino- aprendizagem e avaliação em educação online**," Tese, UPM, 2016.

[10] F. Karray et al., "**Human-Computer Interaction: Overview on State of the Art**," International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 1, n. 1, pp. 137-159, 2008.

[11] R. Mendonça, "**Imersão e emoção em jogos digitais: uma abordagem a partir de sistemas especialistas, lógica fuzzy e mapas auto- organizaveis**," Dissertação, UPM, 2012.

[12] H. Korhonen e E. Koivisto, **Playability Heuristics for Mobile Games.** New York, NY: ACM, 2006.

[13] M. Federoff, "**Heuristics and usability guidelines for the creation and evaluation of fun in video games**," Thesis (M.S.), Indiana University, 2002.

[14] A. Proença et al., "**Systematic Review on Cognitive Engineering Applied to Critical Systems for Proposition of Evaluation Heuristics for Virtual Reality**," IEEE Latin America

Transactions, v. 15, n. 10, pp. 2024-2029, 2017.

[15] A. Sukstrienwong, "**Animo Math: the Role-Playing Game in Mathematical Learning for Children**," TEM Journal, Volume 7, Issue 1, pp. 147-154, 2018.

[16] Y. Tang et al., "**Sustain City – A Cyberinfrastructure-Enabled Game System for Science and Engineering Design**," Journal of Computational Science Education, v. 3, issue 1, 2012.

[17] T. Lima et al., "**Playing against dengue Design and development of a serious game to help tackling dengue**," IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH), 2017.

CAPÍTULO 18

FILTRO DE KALMAN BASEADO EM MODELO FUZZY TAKAGI – SUGENO VIA ANÁLISE ESPECTRAL DE DADOS EXPERIMENTAIS

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 03/12/2019

Daiana Caroline dos Santos Gomes
Universidade Federal do Maranhão – UFMA
São Luís – MA
http://lattes.cnpq.br/7384313514159729

Ginalber Luiz de Oliveira Serra
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – MA
http://lattes.cnpq.br/0831092299374520

RESUMO: Este capítulo apresenta uma metodologia para projeto de filtro de Kalman *fuzzy* (FKF) via decomposição espectral dos dados experimentais. A metodologia adotada consiste na estimação paramétrica dos submodelos lineares locais de um modelo *fuzzy* no espaço de estados, referente ao sistema dinâmico, por meio de um algoritmo *fuzzy* baseado em mínimos quadrados. A estimação dos ganhos do FKF baseado no modelo obtido é realizada pelo método de compensação paralela e distribuída (CPD). O particionamento dos dados experimentais é realizado pelo algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) para definição da base de regras, bem como da característica não linear do FKF. Considerando-se o método CPD, os ganhos de Kalman no consequente de cada regra do FKF são atualizados em função das componentes não-observáveis resultantes da decomposição espectral do sinal ruidoso. Este aspecto, em particular, permite a eficiência do FKF diante de variações consideráveis do nível de ruído sobre os dados experimentais (relação sinal/ruído). Resultados computacionais ilustram o bom desempenho da metodologia proposta quando comparada a abordagens relevantes da literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Identificação de sistemas, Filtro de Kalman *fuzzy*, Análise Espectral, Estimação Paramétrica, Sistemas *fuzzy*.

FUZZY KALMAN FILTER BASED ON TAKAGI-SUGENO MODEL VIA SPECTRAL ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA

ABSTRACT: This chapter presents a methodology for design of fuzzy Kalman filter (FKF) via spectral decomposition of the experimental data, is proposed. The adopted methodology consists in parametric estimation of local state space linear submodels of a fuzzy model of the dynamic system, by means of a fuzzy algorithm based on least squares, as well as in estimation of FKF gains from the fuzzy model, using the parallel and distributed compensation (PDC) method. The partitioning of experimental data, for definition of the rule base as well as the nonlinear FKF characteristic, is performed by

fuzzy C-Means (FCM) clustering algorithm. Considering the PDC method, the Kalman gains in the consequent of each FKF rule are updated as a function of the unobservable components resulting from the spectral decomposition of noisy experimental data. In particular, it allows to FKF efficiency in the face of considerable variations in the noise level over the experimental data (signal/noise ratio). Computational results illustrate the good performance of the proposed methodology when compared to relevant approaches from the literature.
KEYWORDS: Systems identification, Fuzzy Kalman Filter, Spectral analysis, Parametric estimation, Fuzzy systems.

1 I INTRODUÇÃO

Em ciências e engenharia, é muito comum a solução de problemas de natureza estocástica como predição, separação e detecção de sinais na presença de ruído (KASASBEH; VISWANATHAN; CAO, 2017) (ZHU et al., 2019). O filtro de Kalman (FK) é a ferramenta matemática mais conhecida e utilizada para estimação estocástica a partir de medições ruidosas. Ele foi proposto em 1960 por Rudolph E. Kalman em seu artigo intitulado *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*", descrevendo uma solução recursiva para o problema da filtragem linear no domínio do tempo discreto (KALMAN, 1960), tornando-se uma abordagem padrão para estimação ótima. Desde sua publicação, o filtro de Kalman foi objeto de extensa pesquisa e aplicações nas áreas de cálculo de órbita, rastreamento de alvos, navegação integrada, posicionamento dinâmico, fusão de dados de sensor, microeconomia, controle, modelagem, processamento digital de imagem, reconhecimento de padrão, segmentação e detecção de borda de imagem, entre outras. Este amplo interesse pelo FK é devido a sua característica de otimalidade, forma conveniente para processamento online em tempo real, fácil formulação e implementação (SERRA, 2018).

Nos últimos anos, os sistemas *fuzzy* vem se destacando em aplicações na área de modelagem e controle de sistemas dinâmicos devido a sua estrutura baseada em regras capaz de fazer aproximação de funções e tratamento de não linearidades e incertezas (SERRA, 2012). Alguns estudos envolvendo a utilização de sistemas *fuzzy* no projeto de filtros de Kalman, já tem sido propostos no intuito de melhorar sua robustez em relação a modelagem de incertezas e perturbações do sistema dinâmico (PIRES; SERRA, 2019).

A metodologia apresentada neste capítulo está baseada na construção de um Filtro de Kalman utilizando modelos *fuzzy* Takagi-Sugeno (TS) no domínio do tempo discreto. A principal contribuição deste capítulo consiste no mecanismo de ajuste dos ganhos de Kalman que compõem a base de regras do filtro de Kalman *fuzzy*, o qual

leva em consideração a decomposição dos estados a serem estimados, corrompidos por ruído, utilizando análise espectral singular. A eficiência e aplicabilidade da metodologia proposta são ilustradas na sua aplicação ao problema da estimação de estados de um sistema dinâmico não linear com comportamento caótico.

2 I ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA DO FILTRO DE KALMAN *FUZZY*

Nesta seção, é apresentada a formulação matemática da metodologia proposta. A classe de modelos *fuzzy* adotada, para representar o comportamento de um sistema dinâmico não linear, apresenta a $i|^{[i=1,2,\ldots,r]}$-ésima regra dada por:

$$\begin{aligned} &\text{SE } z_{1_k} \text{ É } M_{i1} \; e \ldots e \; z_{p_k} \text{ É } M_{iq} \\ &\text{ENTÃO } \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{i} = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_k^i + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_k \\ \hat{\mathbf{y}}_k^i = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}_k^i \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

onde $z_{1_k} \cdots z_{p_k}$ são as variáveis linguísticas do antecedente, M_{iq} são os respectivos termos linguísticos, $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^{i}$ representa os estados estimados do sistema dinâmico não linear, $\hat{\mathbf{y}}_k^i$ é o sinal de saída estimada e $\mathbf{u}_k$ é o sinal de entrada aplicado no sistema não linear. As matrizes $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$, $\mathbf{C}_i$ são, respectivamente, de estados, entrada e saída, as quais formam um submodelo linear no espaço de estados que descreve a dinâmica do sistema não linear em torno de um ponto de operação, no consequente da *i*-ésima regra. O modelo *fuzzy* aproxima o comportamento do sistema dinâmico não linear, através da soma ponderada dos submodelos do consequente, em função do grau de ativação normalizado $\gamma^i(z_k)$ da *i*-ésima regra, como segue:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \sum_{i=1}^{r} \gamma^i(z_k)\mathbf{A}_i\hat{\mathbf{x}}_k + \sum_{i=1}^{r} \gamma^i(z_k)\mathbf{B}_i\mathbf{u}_k \tag{2}$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \sum_{i=1}^{r} \gamma^i(z_k)\mathbf{C}_i\hat{\mathbf{x}}_k \tag{3}$$

onde r é o número de regras do modelo *fuzzy*, tal que:

$$\sum_{i=1}^{r} \gamma^i(z_k) = 1, \qquad \gamma^i(z_k) \geq 0. \tag{4}$$

2.1 Estimação paramétrica do antecedente

O particionamento dos dados experimentais, de acordo com a metodologia adotada, implicará na definição das regiões de operação e, necessariamente, do número de regras do FKF. Dentre os diversos algoritmos existentes para esta

finalidade, o FCM apresenta importante aplicabilidade devido a sua eficiência e simplicidade de implementação (ZHANG et al., 2019)(KIM; OH; PEDRYCZ, 2018). O algoritmo de agrupamento FCM é formulado como segue (BABUŠKA, 1998). Seja um conjunto de dados $\mathbf{Z}$ de tamanho N, e a matriz de partição inicial $\mathbf{U}^{(0)}$; escolhe-se o número de agrupamentos $1 < r < N$, a tolerância $\varepsilon > 0$ e o expoente de ponderação $m > 1$.

Repetir para $l = 1,2, \ldots$

Passo 1: Cálculo dos centros dos agrupamentos:

$$\mathbf{v}_i^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \mu_{ik}^{(l-1)} \mathbf{z}_k}{\sum_{k=1}^{N} \left(\mu_{ik}^{(l-1)}\right)^m}, \qquad 1 \leq i \leq r \tag{5}$$

Passo 2: Cálculo das distâncias:

$$D_{ik\mathbf{A}}^2 = \left(\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i^{(l)}\right)^T \mathbf{A} \left(\mathbf{z}_k - \mathbf{v}_i^{(l)}\right),$$

$$\text{com } 1 \leq i \leq r, 1 \leq k \leq N \text{ e } \mathbf{A} = I \tag{6}$$

Passo 3: Atualização da matriz de partição:

Se para ,

Se $D_{ikA} > 0$ para $1 \leq i \leq r$, $1 \leq k \leq N$

$$\mu_{ik}^{(l)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{r} \left(D_{ik\mathbf{A}} / D_{jk\mathbf{A}}\right)^{2/(m-1)}} \tag{7}$$

caso contrário

$\mu_{ik}^{(l)} = 0$ se $D_{ikA} > 0$ e $\mu_{ik}^{(l)} \in [0,1]$ com $\sum_{i=1}^{r} \mu_{ik}^{(l)} = 1$

Até $\left\|\mathbf{U}^{(l)} - \mathbf{U}^{(l-1)}\right\| < \epsilon$

2.2 Estimação paramétrica do consequente

Uma vez que, de acordo com a metodologia adotada, o projeto do FKF é baseado em modelo, faz-se necessário a estimação das matrizes que compõem o modelo *fuzzy*, descrito na eq. (1). Para isso, um algoritmo *fuzzy* baseado em mínimos quadrados, usando-se a abordagem local, foi desenvolvido, onde as partições dos dados experimentais, obtidas pelo algoritmo de agrupamento FCM, serviram como critérios de ponderação para a estimação dos submodelos locais do consequente do modelo *fuzzy*.

A equação de estados do modelo *fuzzy* da eq. (2), para a *i*-ésima regra, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{x}_{k+1}^T = \gamma_k^1[\mathbf{x}_k^T \quad \mathbf{u}_k^T]\begin{bmatrix}\mathbf{A}_1^T \\ \mathbf{B}_1^T\end{bmatrix} + \cdots + \gamma_k^r[\mathbf{x}_k^T \quad \mathbf{u}_k^T]\begin{bmatrix}\mathbf{A}_r^T \\ \mathbf{B}_r^T\end{bmatrix} \tag{8}$$

De acordo com a abordagem local, adotada nesta metodologia, e fazendo-se N observações para eq. (8), o *i*-ésimo submodelo é obtido da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\gamma_0^i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \gamma_1^i & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \gamma_{N-1}^i\end{bmatrix}\mathbf{D}\begin{bmatrix}\mathbf{A}_i^T \\ \mathbf{B}_i^T\end{bmatrix} \tag{9}$$

onde

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix}\mathbf{x_0} & \mathbf{u_0} \\ \mathbf{x_1} & \mathbf{u_1} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{x}_{N-1} & \mathbf{u}_{N-1}\end{bmatrix} \tag{10}$$

Logo, da eq. (9) tem-se que

$$\mathbf{X} = \mathbf{\Gamma}_i\mathbf{D}\begin{bmatrix}\mathbf{A}_i^T \\ \mathbf{B}_i^T\end{bmatrix} \tag{11}$$

A eq. (11) pode ser solucionada para cada submodelo correspondente ao consequente das regras *fuzzy* como segue:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{A}_i^T \\ \mathbf{B}_i^T\end{bmatrix} = [\mathbf{D}^T\mathbf{\Gamma}_i\mathbf{D}]^{-1}\mathbf{D}^T\mathbf{\Gamma}_i\mathbf{X} \tag{12}$$

onde

$\mathbf{D}$ é a é a matriz com os estados em atraso e entrada $\mathbf{u}$ aplicada no sistema dinâmico;

$\mathbf{X}$ é o vetor de estados em avanço;

$\mathbf{x}_k = [x_{1_k} \quad x_{2_k} \quad \cdots \quad x_{n_k}]$ é o vetor com todos os estados do sistema dinâmico;

$\mathbf{\Gamma}_i$ é a matriz diagonal de ponderação da *i*-ésima regra *fuzzy* obtida a partir do algoritmo de agrupamento FCM.

2.3 Modelo do filtro de kalman fuzzy

Nesta seção, a formulação da metodologia adotada para a parametrização do Filtro de Kalman *Fuzzy* baseado em modelo, a partir do processamento dos dados experimentais via análise espectral singular, é apresentado.

2.3.1 Pré processamento por análise espectral

Seja o conjunto de dados experimentais ruidosos, do sistema dinâmico sob

análise, com N amostras, dado por:

$$\mathbf{Y} = [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_N]^T \tag{13}$$

A partir dos dados experimentais, uma matriz trajetória $\mathbf{H}$ é definida considerando-se um conjunto de ρ vetores atrasados com dimensão $ \delta $, sendo δ um número inteiro definido pelo usuário, com $2 \leq \delta \leq N - 1$ e $\rho = N - \delta + 1$, dada por:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_\rho \\ y_2 & y_3 & y_4 & \cdots & y_{\rho+1} \\ y_3 & y_4 & y_5 & \cdots & y_{\rho+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_\delta & y_{\delta+1} & y_{\delta+2} & \cdots & y_N \end{bmatrix} \tag{14}$$

e a matriz de covariância $\mathbf{S}$, é obtida da seguinte forma:

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}\mathbf{H}^T, \qquad \mathbf{S} \in \mathbb{R}^{\delta \times \delta} \tag{15}$$

Aplicando-se a decomposição em valores singulares à matriz $\mathbf{S}$, obtém-se um conjunto de autovalores em ordem decrescente tal que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_L \geq 0$ com seus respectivos autovetores $\phi_1, \phi_2, \ldots \phi_\delta$.

Considerando-se $d = max\{i,$ tal que $\sigma_i > 0\}$ e $\mathbf{V}_i = \mathbf{H}^T \phi_i / \sqrt{\sigma_i}$ com $i = 1, \ldots, d$, a decomposição em valores singulares da matriz trajetória $\mathbf{H}$, pode ser reescrita por:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 + \cdots + \mathbf{H}_d \tag{16}$$

onde a matriz $\mathbf{H}_i$ é elementar, isto é, apresenta *rank* igual a 1, e é dada por:

$$\mathbf{H}_i = \sqrt{\sigma_i} \boldsymbol{\phi}_i \mathbf{V}_i^T \tag{17}$$

O reagrupamento das matrizes $\mathbf{H}_i|^{i=1,\ldots,d}$ em p termos matriciais linearmente independentes $\mathbf{I}_j|^{j=1,\ldots,p}$, tal que $p \leq d$, resulta em:

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \cdots + \mathbf{I}_p \tag{18}$$

As p componentes não-observáveis $\boldsymbol{\alpha}^j|^{j=1,\ldots,p}$ extraídas dos dados experimentais, resultam do procedimento de média diagonal sobre a matriz $\mathbf{I}_j$, dado por:

$$\boldsymbol{\alpha}_k^j = \begin{cases} \dfrac{1}{k}\displaystyle\sum_{\beta=1}^{k+1} I_{j_{\beta,k-\beta+1}} & 1 \le k \le \delta^* \\ \dfrac{1}{\delta^*}\displaystyle\sum_{\beta=1}^{\delta^*} I_{j_{\beta,k-\beta+1}} & \delta^* \le k \le \rho^* \\ \dfrac{1}{N-k+1}\displaystyle\sum_{\beta=k-\rho^*+1}^{N-\rho^*+1} I_{j_{\beta,k-\beta+1}} & \rho^* < k \le N \end{cases} \tag{19}$$

onde $\delta^* = min(\delta, \rho)$, $\rho^* = max(\delta, \rho)$ e $N = \delta + \rho - 1$.

Assim, o FKF apresenta o consequente da *i*-ésima regra, em função da componente espectral não-observável α^*, dado por:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{i^-} = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{k-1}^{i^-} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{k-1} \tag{20}$$

$$\mathbf{P}_k^{i^-} = \mathbf{A}_i \mathbf{P}_{k-1}^i \mathbf{A}_i^T + \mathbf{Q} \tag{21}$$

$$\mathbf{K}_k^i = \mathbf{P}_k^{i^-} \mathbf{C}_i^T \left[\mathbf{C}_i \mathbf{P}_k^{i^-} \mathbf{C}_i^T + \mathbf{R}\right]^{-1} \tag{22}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^i = \hat{\mathbf{x}}_k^{i^-} + \mathbf{K}_k^i \left(\boldsymbol{\alpha}^* - \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}_k^{i^-}\right) \tag{23}$$

$$\mathbf{P}_k^i = \mathbf{P}_k^{i^-} - \mathbf{K}_k^i \mathbf{C}_i \mathbf{P}_k^{i^-} \tag{24}$$

onde

$\hat{\mathbf{x}}_k^{i^-}$ é o estado estimado *a priori* correspondente ao *i*-ésimo submodelo no instante de tempo *k*;

$\mathbf{x}_{k-1}^{i^-}$ é o estado estimado a posteriori correspondente ao *i*-ésimo submodelo no instante de tempo passado *k-1*;

$\mathbf{P}_k^{i^-}$ é matriz de covariância do erro *a priori*;

$\mathbf{P}_{k-}^i$ é a matriz de covariância do erro *a posteriori*;

$\mathbf{K}_k^i$ é o ganho de Kalman correspondente ao *i*-ésimo submodelo;

$\mathbf{Q}$ é a matriz de covariância do ruído de processo associado a perturbações internas do sistema dinâmico;

$\mathbf{R}$ é a matriz de covariância do ruído de medição associado a incertezas nas observações do sinal de saída do sistema dinâmico;

$\boldsymbol{\alpha}^*$ é o sinal ruidoso após o pré-processamento por análise espectral singular.

3 I RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção, um exemplo computacional de rastreamento dos estados de um

sistema dinâmico não-linear com comportamento caótico, em ambiente ruidoso, será apresentado. Para ilustrar a eficiência da metodologia proposta, será realizada uma análise comparativa com um Filtro de Kalman *Fuzzy* baseado na metodologia proposta por (PÁRAMO-CARRANZA et al., 2017) e largamente citada na literatura, sob o contexto de variação dos níveis de ruído SNR (relação sinal/ruído - do inglês *Signal Noise Ratio*).

O sistema dinâmico não linear sob análise consiste no atrator caótico de Lorenz, descrito por (HUANG; ZHANG; ZHAO, 2015):

$$\dot{x}_1 = a(x_2 - x_1) \tag{25}$$

$$\dot{x}_2 = cx_1 - x_2 - x_1x_3 \tag{26}$$

$$\dot{x}_3 = x_1x_2 - bx_3 \tag{27}$$

onde os parâmetros $a = 10$, $b = 8/3$ e $c = 28$ proporcionam ao sistema não linear um comportamento caótico.

Uma vez que a metodologia proposta para o projeto do FKF é baseada em modelo, faz-se necessário a identificação do sistema não linear supracitado baseado na estrutura de modelo *fuzzy* adotada conforme eq. (1). Para tal, um conjunto de dados experimentais do sistema dinâmico não linear foram adquiridos, de tamanho $N = 10000$, a um período de amostragem de $T = 1\,ms$, e o particionamento referente à variável de estado x_1 foi realizado através do algoritmo de agrupamento FCM para, assim, definir a estrutura do antecedente e o número de regras do FKF. Na implementação do algoritmo de agrupamento FCM, adotou-se a seguinte parametrização: número de agrupamentos $r = 3$ e índice de fuzificação $m = 1.5$.

A partição dos dados experimentais referentes à variável de estado x_1, obtida pelo algoritmo de agrupamento FCM, serviu como critério de ponderação para a estimação das matrizes que compõem o consequente do modelo *fuzzy* descrito na eq. (1). Para isso, foi empregada a abordagem local na implementação de um algoritmo *fuzzy* baseado em mínimos quadrados para o atrator caótico de Lorenz.

As matrizes estimadas do modelo *fuzzy* serviram para o projeto e parametrização do FKF, conforme eq. (20)-(24). O processamento das variáveis de estado, pelo FKF, de acordo com a metodologia proposta, é em função das componentes não observáveis extraídas pela análise espectral singular dos dados experimentais ruidosos do atrator caótico de Lorenz. A dinâmica das variáveis de estado do atrator caótico de Lorenz foram corrompidas por ruído e, variando-se o nível de ruído (SNR), foram obtidas as estimativas dos estados usando-se o FKF baseado na metodologia proposta, através dos resultados de 10 realizações. Nesta aplicação, considerou-se a decomposição dos dados ruidosos referentes à variável de estado x_1 em 2

componentes espectrais, e usou-se a componente com maior autovalor associado que representasse a dinâmica do atrator caótico de Lorenz.

A fim de demonstrar a eficiência do FKF baseado na metodologia proposta, comparada com o FKF proposto por (PÁRAMO-CARRANZA et al., 2017), utilizou-se o critério de validação MSE *Mean Square Error* como índice de avaliação de desempenho no processo de estimação dos estados do atrator caótico de Lorenz. Os valores de MSE, para diferentes níveis de ruído (SNR), considerando-se o efeito de 10 realizações na estimação das variáveis de estado x_1, x_2 e x_3 são mostrados nas figuras (1)-(3), respectivamente.

Figura 1: Valores de MSE resultantes do processo de estimação da variável de estado x_1, considerando-se o efeito de 10 realizações.

Figura 2: Valores de MSE resultantes do processo de estimação da variável de estado x_2, considerando-se o efeito de 10 realizações.

Figura 3: Valores de MSE resultantes do processo de estimação da variável de estado x_3, considerando-se o efeito de 10 realizações.

Observa-se que, com a metodologia proposta neste artigo, a dinâmica das variáveis de estado do atrator caótico de Lorenz foram rastreadas de forma

eficiente, apresentando um desempenho superior quando comparado à metodologia proposta em (PÁRAMO-CARRANZA et al., 2017), para diferentes níveis de ruído. Considerando-se o caso particular de SNR = 0.65, o comportamento referente à variável de estado x_1, do atrator caótico de Lorenz, bem como as componentes espectrais extraídas, são mostrados nas Figuras (4)-(6). Uma vez que a componente α^2, mostrada na Figura (6), está mais correlacionada à dinâmica da variável de estado x_1, enquanto que a componente α^1,, mostrada na Figura (5), apresenta um comportamento mais correlacionado ao ruído, a componente α^2 foi utilizada para implementação do FKF proposto, no processo de estimação das variáveis de estado do atrator caótico de Lorenz.

Figura 4: Variável de estado x_1 do atrator caótico de Lorenz corrompida por ruído com SNR = 0.65.

Figura 5: Componente espectral α^1 extraída da variável de estado x_1 em ambiente ruidoso com SNR = 0.65.

Figura 6: Componente espectral α^2 extraída da variável de estado x_1 em ambiente ruidoso com SNR = 0.65.

As estimações das variáveis de estado x_1, x_2 e x_3, do atrator caótico de Lorenz, usando-se a metodologia proposta neste artigo, estão ilustradas na Figura (7). As estimações das variáveis de estado x_1, x_2 e x_3, do atrator caótico de Lorenz, usando-se a metodologia proposta por (PÁRAMO-CARRANZA et al., 2017), estão ilustradas na Figura (8). Verifica-se, portanto, a eficiência e o melhor desempenho do

FKF proposto neste artigo.

Figura 7: Estimações das variáveis de estado x_1, x_2 e x_3 pelo FKF baseado na metodologia proposta neste artigo (linha tracejada), comparadas aos comportamentos nominais das respectivas variáveis (linha sólida), para o caso de SNR = 0.65.

Figura 8: Estimações das variáveis de estado x_1, x_2 e x_3 pelo FKF baseado na metodologia proposta em Páramo-Carranza et al. (2017) (linha tracejada), comparadas aos comportamentos nominais das respectivas variáveis (linha sólida), para o caso de SNR = 0.65.

4 I CONCLUSÕES

Neste artigo, o projeto de um Filtro de Kalman *Fuzzy* baseado em modelo, em função das componentes espectrais dos dados experimentais, foi proposto. A partir dos resultados obtidos, o FKF baseado na metodologia proposta mostrou-se eficiente na filtragem e estimação dos estados de um sistema dinâmico não linear com comportamento caótico. A covariância dos ruídos de processo e de medição são variáveis empíricas e foram definidas de acordo com o trabalho utilizado para fins de comparação. O número de componentes a serem extraídas dos dados do sistema dinâmico pode ser alterado dependendo da necessidade do projetista. Para fins de trabalhos futuros, a formulação e aplicabilidade desta metodologia no contexto multivariável com modelos *fuzzy* tipo-2, é de particular interesse.

AGRADECIMETOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão (PPGEE/UFMA) pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BABUŠKA, R. **Fuzzy Modeling for Control**. [s.l: s.n.]. v. 12

HUANG, Y.; ZHANG, P.; ZHAO, W. Novel grid multiwing butterfly chaotic attractors and their circuit design. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, v. 62, n. 5, p. 496–500, 2015.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, v. 82, n. 1, p. 35–45, 1960.

KASASBEH, H.; VISWANATHAN, R.; CAO, L. Noise correlation effect on detection: Signals in equicorrelated or autoregressive(1) Gaussian. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 24, n. 7, p. 1078–1082, 2017.

KIM, E. H.; OH, S. K.; PEDRYCZ, W. Design of Reinforced Interval Type-2 Fuzzy C-Means-Based Fuzzy Classifier. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 26, n. 5, p. 3054–3068, 2018.

PÁRAMO-CARRANZA, L. A. et al. Discrete-time Kalman filter for Takagi–Sugeno fuzzy models. **Evolving Systems**, v. 8, n. 3, p. 211–219, 2017.

PIRES, D. S.; SERRA, G. L. DE O. Methodology for Evolving Fuzzy Kalman Filter Identification Danúbia Soares Pires and Ginalber Luiz de Oliveira Serra * To link to this article : Methodology for Evolving Fuzzy Kalman Filter Identification. v. 17, n. 3, p. 793–800, 2019.

SERRA, G. L. O. (ED.). **Frontiers in Advanced Control Systems**. [s.l: s.n.].

SERRA, G. L. O. (ED.). **Kalman Filters: Theory for Advanced Applications**. [s.l: s.n.]. v. i

ZHANG, Y. et al. Deviation-sparse fuzzy C-means with neighbor information constraint. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 27, n. 1, p. 185–199, 2019.

ZHU, X. et al. Signal Detection in Generalized Gaussian Distribution Noise with Nakagami Fading Channel. **IEEE Access**, v. 7, p. 23120–23126, 2019.

CAPÍTULO 19

CONSTRUÇÃO, DESIGN DE CONTROLE E CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR BLUETOOTH DE UM ROBÔ AUTO EQUILIBRANTE

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 07/12/2019

Giulio Cesare Mastrocinque Santo
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo – SP

Claudio Garcia
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo – SP

RESUMO: Este artigo aborda o problema de controle discreto multivariável de um robô auto equilibrante, considerando as ações de controle nas duas rodas de forma independente. Um algoritmo de alocação de polos, bem como um Controlador Linear Quadrático são implementados para o problema de regulação e posteriormente estendidos para o problema de rastreamento de trajetórias unidirecionais e bidirecionais. O problema de filtragem de ruído de medição é discutido e filtros de primeira ordem são aplicados. Um Filtro de Kalman é usado para realizar a fusão de sensores. Aspectos da construção do robô e de implementação dos algoritmos também são discutidos de forma a permitir o uso dos algoritmos apresentados. O controle bidirecional é realizado através de um dispositivo de Bluetooth, de forma que esta aplicação pode ser facilmente estendida para problemas mais sofisticados de controle de trajetória.

PALAVRAS-CHAVE: Alocação de Polos; Controle de Trajetória por Bluetooth; Controle Linear Quadrático; Filtro de Kalman; Fusão de Sensores.

CONSTRUCTION, CONTROL DESIGN AND BLUETOOTH TRAJECTORY CONTROL OF A SELF-BALANCING ROBOT

ABSTRACT: This paper is concerned with the multivariable discrete-time control problem of a self-balancing robot, considering the actuator in both wheels independently. A pole placement and a Linear Quadratic Regulator (LQR) controller are designed for the regulation problem and extended to the unidirectional and bidirectional trajectory tracking problems. Sensor noise filtering is discussed, and first order filters are applied. A Kalman Filter is implemented for sensor fusion. Robot construction and implementation aspects are also discussed in order to allow the use of the algorithms presented. The bidirectional control problem is accomplished through a Bluetooth device in such a way that this application could easily be extended to more sophisticated trajectory control problems.

KEYWORDS: Pole Placement; Bluetooth Trajectory Control; Linear Quadratic Regulator; Kalman Filter; Sensor Fusion.

1 I INTRODUCTION

A self-balancing robot can be considered a prototype of the Segway HT personal transporter. Moreover, this two-wheeled robot is a variation of the inverted pendulum, widely studied in control systems theory and, therefore, has great interest in the scientific community.

Quite a few works have been done concerning the control problem of the balancing robot. Juang et al. (2013) present a PID and an LQR-based PI-PD control design. A similar work can be found in (Martins; Nunes, 2017). In (Lam et al. 2001) a two-wheeled mobile robot (WMR) is controlled using a fuzzy model. Kim et al. (2017) develop a nonlinear optimal control for an underactuated inverted pendulum mobile platform. In the work of Ali et al. (2018), and controllers are designed. Kim et al. (2018) present a position-tracking controller using invariant dynamic surface. A model predictive control is applied to an unstable heavy self-balancing robot by Okulski et al. (2018).

Herein, multivariable discrete-time controllers (pole placement and LQR) are developed and they are applied to unidirectional and bidirectional trajectories tracking. The tracking problem is implemented using a Bluetooth device, so that the bidirectional trajectory can be sent to the robot by a computer or by a portable device like a smartphone in a joystick fashion. Therefore, the problem discussed in this work can be easily extended to more advanced control problems. In addition, practical aspects of implementation are discussed, in order to allow one to use the proposed algorithms.

2 I PLANT MODEL

A self-balancing robot was built and construction features are addressed. A Lagrangian model proposed by Goes et al. (2018) is adopted to model the robot in two dimensions.

The control actions were taken as independent and the yaw angle was included, allowing to control the robot in the 2D plane of motion. Fig. 1 represents the adopted model: C.M is the Center of Mass of the robot; L is the distance between the C.M and the origin (wheel axle); is the pitch angle, is a generic yaw angle, is the wheel radius, is the wheel mass and is the wheel moment of inertia. Goes et al. (2018) apply two different coordinate systems: system {0} is fixed and represented by vectors (i, j, k) and system {1} that moves along with C.M, represented by .

Fig. 1. Robot free body diagram.

(Source: Author's own development)

The model was derived based on the Lagrangian method, resulting in Lagrange Equation (1),

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = \frac{1}{2}\left(J_w + m_w {R_w}^2\right)\left({\omega_r}^2 + {\omega_l}^2\right) + \frac{1}{2}\left({\omega_p}^2 I_{xx}\right) \\ + \frac{1}{2}\frac{R_w^2}{D_w^2}\left(I_{yy}\, cos^2(\theta_p) + I_{zz}\, sin^2(\theta_p)\right)(\omega_r - \omega_l)^2 \\ + \frac{1}{2} m_p \left[\left(\frac{LR_w}{D_w}\right)^2 (\omega_r - \omega_l)^2 sin^2(\theta_p) + L^2\omega_p^2\right] \\ + \frac{1}{2} m_p \left[\frac{1}{4}(\omega_r + \omega_l)^2 R_w^2 + LR_w\omega_p(\omega_r + \omega_l)cos(\theta_p)\right] \\ - m_p g L cos(\theta_p)\end{aligned} \tag{1}$$

where ω_p is the pitch angular velocity of the robot; I_{xx}, I_{yy} and I_{zz} are the inertial moments about the centre of mass; m_p is the robot (C.M) mass; D_w is the distance between the two wheels and g is the gravitational constant.

Variable changes were made in order to control y and α positions, as presented in (2) and (3).

$$y = \frac{R_w}{2}(\theta_r + \theta_l) \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{R_w}{D_w}(\theta_r - \theta_l) \tag{3}$$

These transformations can be further extended in (4) and (5).

$$\omega_r = \dot{\theta}_r = \frac{\dot{y}}{R_w} + \frac{D_w}{2R_w}\dot{\alpha} \;\therefore\; \dot{\omega}_r = \frac{\ddot{y}}{R_w} + \frac{D_w}{2R_w}\ddot{\alpha} \tag{4}$$

$$\omega_l = \theta_l = \frac{\dot{y}}{R_w} - \frac{D_w}{2R_w}\dot{\alpha} \therefore \dot{\omega}_l = \frac{\ddot{y}}{R_w} - \frac{D_w}{2R_w}\ddot{\alpha} \tag{5}$$

Notice that ω_r and ω_l are the angular velocities of the right and left wheels, respectively.

The equations of motion of the system were obtained solving the Euler-Lagrange Equation (6),

$$\frac{dy}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i \tag{6}$$

where q_i are the generalized coordinates, here represented by θ_p, α and ; y; Q_i are the internal torques, estimated by (7), (8) and (9).

$$Q_p = \tau_p \tag{7}$$

$$Q_\alpha = \tau_l - \tau_r \tag{8}$$

$$Q_y = \tau_l + \tau_r \tag{9}$$

Notice that τ_r, τ_l and τ_p are calculated as shown in (10), (11) and (12),

$$\tau_r = \frac{K_{mr}}{R_r}\left(PWM_r \,.\, V_{max} - K_{er}(w_r - w_p)\right) \tag{10}$$

$$\tau_l = \frac{K_{ml}}{R_l}\left(PWM_l \,.\, V_{max} - K_{el}(w_l - w_p)\right) \tag{11}$$

$$\tau_p = -(\tau_r + \tau_l) \tag{12}$$

being τ_r and τ_l the right and left wheel's applied torque; τ_p is the torque applied to the robot; PWM_r and PWM_l are the right and left control input signals (varying from -1 to 1); K_m is the motor torque constant; K_e is the motor voltage constant, R_l and R_r the motors resistance and V_{max} the DC voltage feeding each motor (12.1 V). Each motor has its own constants.

To obtain the linear system in the form of (13),

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{6}$$

with $\boldsymbol{x}$ being the state vector and $\boldsymbol{u}$ the control input vector, the Jacobian matrix was solved for the equilibrium point (θ_p=0, $w_p = 0, \alpha = 0, \dot{\alpha} = 0, y = 0, \dot{y} = 0$).

Parameters were obtained from a real self-balancing robot (Fig. 2) and its model was implemented in Autodesk Inventor®, using the parameters shown in Table 1.

Fig. 2. Physical and virtual robot.

(Source: Author's own development)

Variables	Values	Descriptions
m_p	$1.577\ kg$	Mass of the robot
m_w	$0.103\ kg$	Mass of each wheel
I_{xx}	$0.01585\ kg \cdot m^2$	Moment of inertia in C.M x direction
I_{yy}	$0.008377\ kg \cdot m^2$	Moment of inertia in C.M y direction
I_{zz}	$0.023032\ kg \cdot m^2$	Moment of inertia in C.M z direction
R_w	$0.05\ m$	Radius of each wheel
J_w	$0.000168\ kg \cdot m^2$	Moment of inertia of each wheel
L	$0.07192\ m$	Distance of the center of mass from the wheel axle
D_w	0.00263 m	Distance between wheels
K_{er}	$0.13\ V\ s/rad$	Right motor voltage constant
K_{el}	$0.13\ V\ s/rad$	Left motor voltage constant
K_{mr}	$0.13\ Nm/A$	Right motor torque constant
K_{ml}	$0.13\ Nm/A$	Left motor torque constant
R_r	$9\ \Omega$	Right motor resistance
R_l	$9\ \Omega$	Left motor resistance
V_{max}	12.1V	DC voltage applied to the motors
g	$9.81\ m/s^2$	Gravitational constant

Table 1. Modelling parameters

(Source: Author's own development)

The resulting dynamic model can be represented by matrices A and B bellow,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 64.2472 & -0.2299 & 0 & 0 & 0 & 4.5984 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3415 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -3.7996 & 0.0156 & 0 & 0 & 0 & -0.3111 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -10.6116 & -10.6116 \\ 0 & 0 \\ -5.9926 & 5.9926 \\ 0 & 0 \\ 0.7180 & 0.7180 \end{bmatrix}$$

being the state vector $x = [\theta_p \quad w_p \quad \alpha \quad \dot{\alpha} \quad y \quad \dot{y}]$. One can easily verify that controllability holds for the system above.

3 I ROBOT CONSTRUCTION

The robot was built with the components in Table 2.

List of Components
12V DC geared motor
Dual H bridge DC motor driver module
Gyroscope and accelerometer sensor module
Arduino M0 Pro 32-bit board
Bi-directional logic level converter (3.3V – 5V)
Bluetooth master slave module
Set of 3 Li-ion 4.2V batteries

Table 2. Robot components

(Source: Author's own development)

3.1 Pitch angle measurement

The pitch angle is measured by the accelerometer. The gyroscope provides the angular velocity in such a way that the angle can be obtained through integration. One way to do that is using the Euler Forward method (14).

$$\theta_p[n] = \theta_p[n-1] + T_s W_p[n-1] \tag{14}$$

Moreover, both measurements can be combined to obtain a better estimative of the angle, which is called sensor fusion (Paina et al. 2011).

One way to merge both measurements is using the Complementary Filter (Paina et al. 2011), by which the resulting angle is obtained (15),

$$\theta_p[n] = \alpha \cdot \left(\theta_p[n-1] + GyroRate\right) + (1-\alpha) \cdot AccAngle \tag{15}$$

where $\alpha = \frac{\tau}{\tau + T_s}$, T_s is the sampling period adopted, $GyroRate$ is the angular velocity measured by the gyroscope and $AccAngle$ is the angle measured by the accelerometer.

Another way to obtain a precise angle is using a Kalman Filter for the fusion, which is the approach adopted in this paper. In this case, a measurement model that includes the accelerometer and the gyroscope is required. Paina et al. (2011) suggests the model in (16),

$$\begin{bmatrix} \theta_{p_{k+1}} \\ \omega_{b,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{p_k} \\ \omega_{b,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \end{bmatrix} \omega_{M,k} + T_s \begin{bmatrix} n_{\omega,k} \\ n_{\alpha,k} \end{bmatrix}$$

$$\theta_{M,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{p_k} \\ \omega_{b,k} \end{bmatrix} + n_{\theta,k} \tag{16}$$

where ω_b is the gyro bias, ω_M is the gyro measurement, θ_M is the accelerometer measurement and n_θ, n_ω and n_α are white noise signals with zero mean and Gaussian distribution.

Implementation requires knowledge of the process noise (R_w) and of the measurement noise (R_v).

$$R_w = E[w_k w_k^T] = \begin{bmatrix} {\sigma_\omega}^2 & \sigma_{\omega\alpha} \\ \sigma_{\omega\alpha} & {\sigma_\alpha}^2 \end{bmatrix}$$

$$R_v = E[v_k v_k^T] = {\sigma_\theta}^2$$

In order to estimate the measurement noise, the robot was placed in vertical position with motors in maximum rotation. The histograms obtained are shown in Fig. 3.

Fig. 3. Gyroscope and accelerometer noise.

(Source: Author's own development)

Based on the resulting variances, the following values were adopted for the process and the measurement noises:

$$R_w = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.00004 \end{bmatrix} \qquad R_v = 0.01$$

Notice that the histograms clearly show the offset of the measurements, which has to be corrected.

The ability to use the measurement noise to tune the filter was the main reason

why this filter was adopted rather than the complementary one. In addition, the Kalman Filter has been extensively studied in the literature and several implementations are available for microcontrollers.

3.2 Yaw angle measurement

The yaw angle was obtained by the variable change mentioned in the modelling section. Consequently, measurements of θ_r and θ_l are required. These were obtained through the DC motor encoders. The resolution of the encoders are 2π/(64·18.8)=0.005222 radians per pulse, measured by both encoder channels (A and B).

A linear first-order filter was applied to the angles in order to reduce noise (17),

$$\theta f_{r,l}[n] = \left(\frac{\tau}{T_s + \tau}\right)\theta f_{r,l}[n-1] + \left(\frac{\tau}{T_s + \tau}\right)\theta_{r,l}[n] \tag{17}$$

where $\theta f_{r,l}[n]$ are the resulting filtered angles.

Finally, to obtain the yaw angle velocity, the Euler Backward method (18) was used with the non-filtered angles and then the resulting derivatives were also filtered (19).

$$\dot{\theta}_{r,l} = \frac{(\theta_{r,l}[n] - \theta_{r,l}[n-1])}{T_s} \tag{18}$$

$$\dot{\theta} f_{r,l}[n] = \left(\frac{\tau}{T_s + \tau}\right)\dot{\theta} f_{r,l}[n-1] + \left(\frac{\tau}{T_s + \tau}\right)\dot{\theta}_{r,l}[n] \tag{19}$$

The same values of $\theta f_{r,l}$ and $\dot{\theta} f_{r,l}$ were used to calculate the system states y and $\dot{y}$. The filter constant considered was $\tau = 0.05$ s and the sampling period was $T_s = 0.01$ s.

4 I CONTROL DESIGN

A MIMO Pole Placement and LQR controllers were applied to the robot for the regulation problem around the equilibrium point. Then, the unidirectional and bidirectional tracking problems are addressed. The control design is based on the discrete-time system, which can be represented by (20),

$$\begin{aligned} x[n+1] &= \Phi x[n] + \Gamma u[n] \\ y &= Cx[n] \end{aligned} \tag{20}$$

where $\Phi = e^{AT_s}$ and $\Gamma = \int_0^{T_s} e^{A\eta} B d\eta$.

4.1 Pole placement

Since one pole for each state must be chosen, for the Pole Placement Controller only the states $[\theta_p \quad w_p \quad \alpha \quad \alpha \quad \dot{y}]$ are considered in order to simplify the design. The following specifications were adopted to guide the design:

- Maximum overshoot:
- Settling time for θ_p and W_p: 0.5 seconds
- Settling time for α and $\dot{\alpha}$: 2.7 seconds
- Settling time for y and $\dot{y}$: 1.3 seconds

These values were chosen based on how fast the robot could reach the desired set-points considering its physical dimensions and the DC motor capacity. Moreover, too fast responses can lead to instability. Therefore, different specifications were validated through simulation and in the real robot until satisfactory values were reached.

In this case, $Y = I_{5x5} \cdot x$ is the system output and the control action that places the poles is $u = -Kx$. Thus, the discrete closed-loop system can be described by (21).

$$x[n+1] = (\Phi - \Gamma K)x[n] \tag{21}$$

The regulation problem meets the specifications if $det(zI - \Phi + \Gamma K) = (z - p_1)(z - p_2)(z - p_3)(z - p_4)\ (z - p_5)$. Only the real part of the poles was taken. The resulting poles are:

$$p_{1,2} = 0.9231 \qquad p_{3,4} = 0.9853 \qquad p_5 = 0.9697$$

The obtained matrix gain is:

$$K = \begin{bmatrix} -4.86 & -0.77 & -0.94 & -0.79 & -3.17 \\ -4.86 & -0.77 & 0.94 & 0.79 & -3.17 \end{bmatrix}$$

Simulation for this control input can be seen in Fig. 4 and results for the real robot are shown in Fig. 5.

Fig. 4. Pole Placement Controller: simulation.

(Source: Author's own development)

Fig. 5. Pole Placement: robot response.

(Source: Author's own development)

4.2 Linear quadratic regulator

The control action of the LQR has the same structure $u = -Kx$ of the Pole Placement Controller. However, the K gain is such that the cost function (22) is minimized,

$$J = \frac{1}{2}\sum_{n=0}^{\infty}(x^T[n]Qx[n] + u^T[n]Ru[n]) \tag{22}$$

where $Q = Q^T \geq 0$ is the given state cost and $R = R^T > 0$ is the input cost matrix.

To obtain the static gain K_{ss} that minimizes the cost function, the Riccati Equation in stationary form (23) is used.

$$P_{ss} = \Phi^T (P_{ss} - P_{ss}\Gamma(R + \Gamma^T P_{ss}\Gamma)^{-1}\Gamma^T P_{ss})\Phi + Q \tag{23}$$

In this case, the stationary gain is given by (24).

$$K_{ss} = R^{-1}\Gamma^T P_{ss} \tag{24}$$

Matrices *Q* and *R* can be obtained using the Bryson rule (Fadali, 2013).

$$Q_{ii} = \frac{1}{Maximum\ Acceptable\ Value\ of\ x_i^2}$$

$$R_{jj} = \frac{1}{Maximum\ Acceptable\ Value\ of\ u_j^2}$$

The design was based on the following limits:

$\theta_p\ max$: 0.01 rad	$\omega_p\ max$: 0.1 rad/s
$\alpha\ max$: 0.05 rad	$\dot{\alpha}\ max$: 0.1 rad/s
$y\ max$: 0.05 m	$\dot{y}\ max$: 0.5 m/s

Notice that all states are considered for the LQR Controller. Moreover, the matrix *R* was chosen to be

$$R = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

The values were chosen higher than the input saturation limit in order to reduce the control input effort.

The obtained matrix gain is:

$$K = \begin{bmatrix} -10.38 & -1.53 & -1.34 & -0.85 & -1.24 & -6.00 \\ -10.38 & -1.53 & 1.34 & 0.85 & -1.24 & -6.00 \end{bmatrix}$$

Simulation results can be seen in Fig. 6 and results for the real robot are shown in Fig. 7.

Fig. 6. LQR Controller: simulation.

(Source: Author's own development)

Fig. 7. LQR Controller: robot response.

(Source: Author's own development)

4.3 Trajectory control

Tracking a specific variable of the robot can be done augmenting the system with an integrator as shown in Fig. 8.

(Source: Author's own development)

Fig. 8. System augmented by integrator.

(Source: Author's own development)

The integrator states can be described as in (25).

$$v[n+1] = v[n] + r[n] - y[n] \tag{25}$$

The feedback law for the augmented system results in (26),

$$\begin{bmatrix} x[n+1] \\ v[n+1] \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & -K_i \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x[n] \\ v[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r[n] \tag{26}$$

where K_i is the integrator gain.

4.3.1 Unidirectional control

In this case, only the linear position y is controlled. A square wave of amplitude 0.5 m and 80 s period was used as the set-point. The following gains were adopted using the Brayson rule

$$K = \begin{bmatrix} -6.59 & -1.09 & -0.11 & -0.17 & -2.03 & -5.19 \\ -6.59 & -1.09 & 0.11 & 0.17 & -2.03 & -5.19 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 0.0041 \\ 0.0041 \end{bmatrix}$$

Simulation results can be seen in Fig. 9 and results for the real robot are shown in Fig. 10.

Fig. 9. Square wave tracking: simulation.

(Source: Author's own development)

Fig. 10. Square wave tracking: robot response.

(Source: Author's own development)

4.3.2 Bluetooth bidirectional control

The 2-dimensional control was performed in a joystick fashion. References for the linear velocity $\dot{y}$ and for the yaw angle α were sent by a serial transmitter that communicates with the Bluetooth HC-05 module. For a forward/backward signal, the y reference signal was increased/decreased by $0.25\ \mathrm{m/s}$. In the same way, the yaw reference was increased/decreased by 0.4 rad for each directional signal received by the Bluetooth. State y was not used in the design. The output signal considered was:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_p \\ \omega_p \\ \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

The following gains were adopted, based on the Brayson rule:

$$K = \begin{bmatrix} -7.00 & -1.05 & -0.93 & -0.42 & -4.10 \\ -7.00 & -1.05 & 0.93 & 0.42 & -4.10 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 0.011 & 0.010 \\ -0.011 & 0.010 \end{bmatrix}$$

The references were transmitted trying to make the robot follow a circular trajectory followed by a linear one with varying velocity. Results can be seen in Fig. 11.

A video of the robot with the LQR algorithm for the bidirectional tracking can be found in https://youtu.be/Gu_qGuta_qA.

Fig. 11. Two-dimensional tracking: robot response.

(Source: Author's own development)

5 I CONCLUSIONS

A self-balancing robot was successfully designed and built. Digital multivariable control strategies were embedded in a microcontroller board and were able to keep the robot in vertical position as well as to allow it track complex trajectories using a Bluetooth transmitter. Implementation techniques were discussed and validated, allowing anyone to use the algorithms presented in this work.

A self-balancing robot was successfully designed and built. Digital multivariable control strategies were embedded in a microcontroller board and were able to keep the robot in vertical position as well as to allow it track complex trajectories using a Bluetooth transmitter. Implementation techniques were discussed and validated, allowing anyone to use the algorithms presented in this work.

REFERENCES

Ali, H.I., Shareef, Z.M. (2018). **Full State Feedback H2 and H-infinity Controllers Design for a Two Wheeled Inverted Pendulum System**. Engineering and Technology Journal, vol. 36 (part A, no. 10), p. 1110–1121.

Fadali, M.S., Visioli, A. (2013). **Digital Control Engineering - Analysis and Design**. Elsevier Inc, 2nd ed. Waltham, MA.

Goes, S.J., Neves, G.P., Angélico, B.A. (2018). **Robô de Duas Rodas Autoequilibrado Seguidor de Linha**. XXII Congresso Brasileiro de Automática. /In Portuguese/.

Juang, H-S., Lurrr, K-Y. (2013). **Design and Control of a Two-Wheel Self-Balancing Robot using the Arduino Microcontroller Board**. 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), p. 634–639.

Kim, S-K., Ahn, C.K., Agarwal, K.R. (2018). **Position-Tracking Controller for Two-Wheeled Balancing Robot Applications Using Invariant Dynamic Surface**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, p. 1–7.

Kim, S., Kwon, S. (2017). **Nonlinear Optimal Control Design for Underactuated Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Platform**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22 (no. 6) , p. 2803–2808.

Lam, H.K., Lee, T.H., Leung, F.H. F., Tam, P.K.S. (2001). **Fuzzy Model Reference Control of Wheeled Mobile Robots.** The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'01), p. 570-573.

Martins, R.S., Nunes, F. (2017). **Control System for a Self-Balancing Robot**. 4th Experiment@ International Conference (exp.at'17), p. 297–302.

Okulski, M., Lawrynczuk, M. (2018). **Development of a Model Predictive Controller for an Unstable Heavy Self-balancing Robot**. 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR), p. 503–508.

Paina, G.F.P., Gaydou, D.A., Redolfi, J., Paz, C.J., Canali, L. (2011). **Experimental Comparison of Kalman and Complementary Filter for Attitude Estimation**. Argentine Symposium on Technology (AST), p. 205–215.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Henrique Ajuz Holzmann - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

João Dallamuta - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

Marcelo Henrique Granza - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Eletrônico. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Doutorando em Engenharia Elétrica. Trabalha com os temas: conversores estáticos com alto fator de potência, acionamento e controle de motores e geradores elétricos de indução.

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
Supervisório 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
2020