


HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
MARCELO HENRIQUE GRANZA
(ORGANIZADORES)

A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

Atena
Editora
Ano 2020



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
MARCELO HENRIQUE GRANZA
(ORGANIZADORES)

A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

Atena
Editora
Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



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

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

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

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

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

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

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

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

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

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

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

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

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

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

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

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

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

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

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

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

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

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

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

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

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

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

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
 Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
 Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
 Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
 Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
 Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
 Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
 Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Douglas Santos Mezacas -Universidade Estadual de Goiás
 Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
 Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
 Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
 Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Me. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
 Profª Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
 Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

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

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

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

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

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

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

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

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

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
Marcelo Henrique Granza

SUMÁRIO

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

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

João Luiz Dallamuta

DOI 10.22533/at.ed.65220230311

CAPÍTULO 12 135

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

Edilberto Pereira Teixeira

Luciano Rangel Pinheiro Neto

DOI 10.22533/at.ed.65220230312

CAPÍTULO 13 147

ESTUDO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO

Pablo Rodrigues Lopes

Rui Bertho Junior

DOI 10.22533/at.ed.65220230313

CAPÍTULO 14 159

MODELAGEM INTELIGENTE NEBULOSA APLICADA À HIDROPONIA VIA SISTEMA EMBARCADO

Kayon Vinicius Lima Lopes

Danúbia Soares Pires

Orlando Donato Rocha Filho

DOI 10.22533/at.ed.65220230314

CAPÍTULO 15 172

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

Rennan Santos de Araujo

Luiz Alberto Luz de Almeida

Felipe Sadami Oiwa da Costa

DOI 10.22533/at.ed.65220230315

CAPÍTULO 16 187

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

Lorena Maria Figueiredo Albuquerque

Kayon Vinicius Lima Lopes

Orlando Donato Rocha Filho

Danúbia Soares Pires

DOI 10.22533/at.ed.65220230316

CAPÍTULO 17 199

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

Mateus Gomes Binatti

Marcos Venícios Conceição de Araújo

Pollyana Coelho da Silva Notargiacomo

DOI 10.22533/at.ed.65220230317

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

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 | 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 | 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); θ is the pitch angle, ψ is a generic yaw angle, r is the wheel radius, m is the wheel mass and I 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 (i_1, j_1, k_1) .

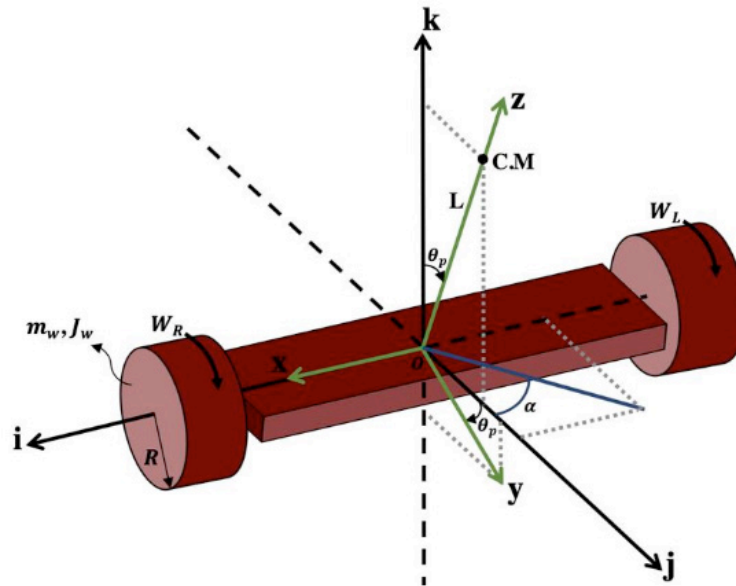


Fig. 1. Robot free body diagram.
(Source: Author's own development)

The model was derived based on the Lagrangian method, resulting in Lagrange Equation (1),

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \frac{1}{2}(J_w + m_w R_w^2)(\omega_r^2 + \omega_l^2) + \frac{1}{2}(\omega_p^2 I_{xx}) \\
 & + \frac{1}{2} \frac{R_w^2}{D_w^2} (I_{yy} \cos^2(\theta_p) + I_{zz} \sin^2(\theta_p))(\omega_r - \omega_l)^2 \\
 & + \frac{1}{2} m_p \left[\left(\frac{L R_w}{D_w} \right)^2 (\omega_r - \omega_l)^2 \sin^2(\theta_p) + L^2 \omega_p^2 \right] \\
 & + \frac{1}{2} m_p \left[\frac{1}{4} (\omega_r + \omega_l)^2 R_w^2 + L R_w \omega_p (\omega_r + \omega_l) \cos(\theta_p) \right] \\
 & - m_p g L \cos(\theta_p)
 \end{aligned} \tag{1}$$

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).

$$\omega_r = \dot{\theta}_r = \frac{\dot{y}}{R_w} + \frac{D_w}{2R_w} \dot{\alpha} \therefore \dot{\omega}_r = \frac{\ddot{y}}{R_w} + \frac{D_w}{2R_w} \ddot{\alpha} \tag{4}$$

$$\omega_l = \dot{\theta}_l = \frac{\dot{y}}{R_w} - \frac{D_w}{2R_w} \dot{\alpha} \therefore \dot{\omega}_l = \frac{\ddot{y}}{R_w} - \frac{D_w}{2R_w} \ddot{\alpha} \quad (5)$$

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),

$$\frac{dy}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i \quad (6)$$

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).

$$Q_p = \tau_p \quad (7)$$

$$Q_\alpha = \tau_l - \tau_r \quad (8)$$

$$Q_y = \tau_l + \tau_r \quad (9)$$

Notice that τ_r , τ_l and τ_p are calculated as shown in (10), (11) and (12),

$$\tau_r = \frac{K_{mr}}{R_r} \left(PWM_r \cdot V_{max} - K_{er} (w_r - w_p) \right) \quad (10)$$

$$\tau_l = \frac{K_{ml}}{R_l} \left(PWM_l \cdot V_{max} - K_{el} (w_l - w_p) \right) \quad (11)$$

$$\tau_p = -(\tau_r + \tau_l) \quad (12)$$

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),

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6)$$

with \mathbf{x} being the state vector and \mathbf{u} the control input vector, the Jacobian matrix was solved for the equilibrium point ($\theta_p=0$, $w_p = 0$, $\alpha = 0$, $\dot{\alpha} = 0$, $y = 0$, $\dot{y} = 0$).

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.

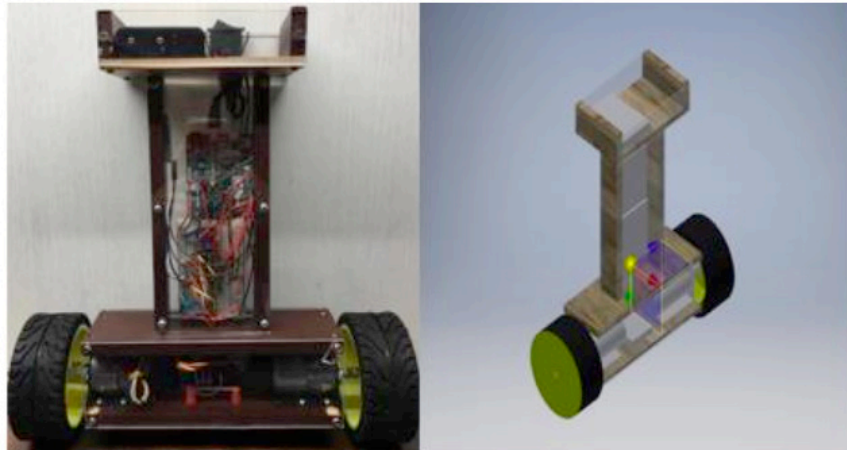


Fig. 2. Physical and virtual robot.
(Source: Author's own development)

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 · m ²	Moment of inertia in C.M x direction
I_{yy}	0.008377 kg · m ²	Moment of inertia in C.M y direction
I_{zz}	0.023032 kg · m ²	Moment of inertia in C.M z direction
R_w	0.05 m	Radius of each wheel
J_w	0.000168 kg · 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 Ω	Right motor resistance
R_l	9 Ω	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 | 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).

$$\theta_p[n] = \theta_p[n - 1] + T_s W_p[n - 1] \quad (14)$$

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),

$$\theta_p[n] = \alpha \cdot (\theta_p[n - 1] + GyroRate) + (1 - \alpha) \cdot AccAngle \quad (15)$$

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),

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \theta_{p,k+1} \\ \omega_{b,k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{p,k} \\ \omega_{b,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \end{bmatrix} \omega_{M,k} + T_s \begin{bmatrix} n_{\omega,k} \\ n_{\alpha,k} \end{bmatrix} \\ \theta_{M,k} &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_{p,k} \\ \omega_{b,k} \end{bmatrix} + n_{\theta,k} \end{aligned} \quad (16)$$

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).

$$\begin{aligned} R_w &= E[w_k w_k^T] = \begin{bmatrix} \sigma_\omega^2 & \sigma_{\omega\alpha} \\ \sigma_{\omega\alpha} & \sigma_\alpha^2 \end{bmatrix} \\ R_v &= E[v_k v_k^T] = \sigma_\theta^2 \end{aligned}$$

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.

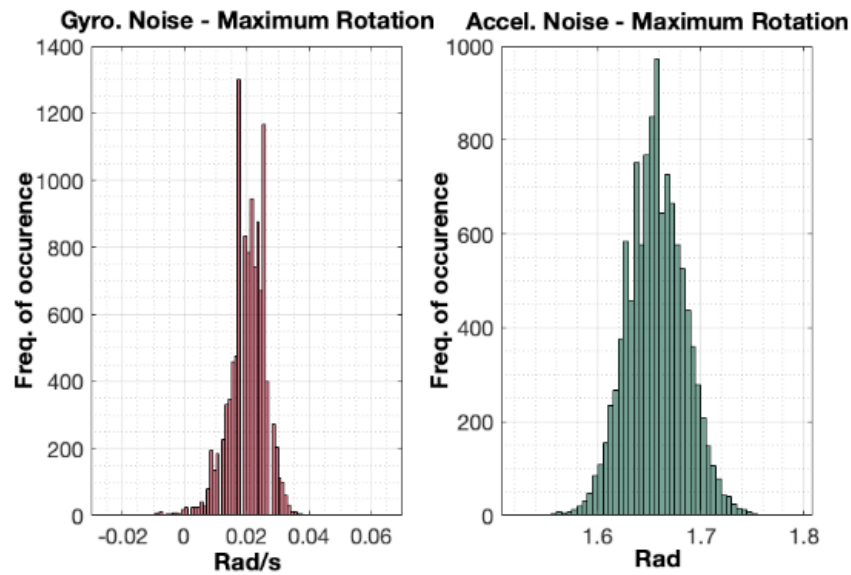


Fig. 3. Gyroscope and accelerometer noise.
(Source: Author's own development)

Based on the resulting variances, the following values were adopted for the process and the measurement noises:

$$R_w = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.00004 \end{bmatrix} \quad R_v = 0.01$$

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 $2\pi/(64 \cdot 18.8) = 0.005222$ 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),

$$\theta_{f_{r,l}}[n] = \left(\frac{\tau}{T_s + \tau} \right) \theta_{f_{r,l}}[n - 1] + \left(\frac{\tau}{T_s + \tau} \right) \theta_{r,l}[n] \quad (17)$$

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).

$$\dot{\theta}_{r,l} = \frac{(\theta_{r,l}[n] - \theta_{r,l}[n - 1])}{T_s} \quad (18)$$

$$\dot{\theta}_{f_{r,l}}[n] = \left(\frac{\tau}{T_s + \tau} \right) \dot{\theta}_{f_{r,l}}[n - 1] + \left(\frac{\tau}{T_s + \tau} \right) \dot{\theta}_{r,l}[n] \quad (19)$$

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 | 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),

$$\begin{aligned} x[n + 1] &= \Phi x[n] + \Gamma u[n] \\ y &= Cx[n] \end{aligned} \quad (20)$$

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 $[\theta_p \ w_p \ \alpha \ \dot{\alpha} \ \dot{y}]$ 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, $Y = I_{5 \times 5} \cdot x$ 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).

$$x[n+1] = (\Phi - \Gamma K)x[n] \quad (21)$$

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:

$$p_{1,2} = 0.9231 \quad p_{3,4} = 0.9853 \quad p_5 = 0.9697$$

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.

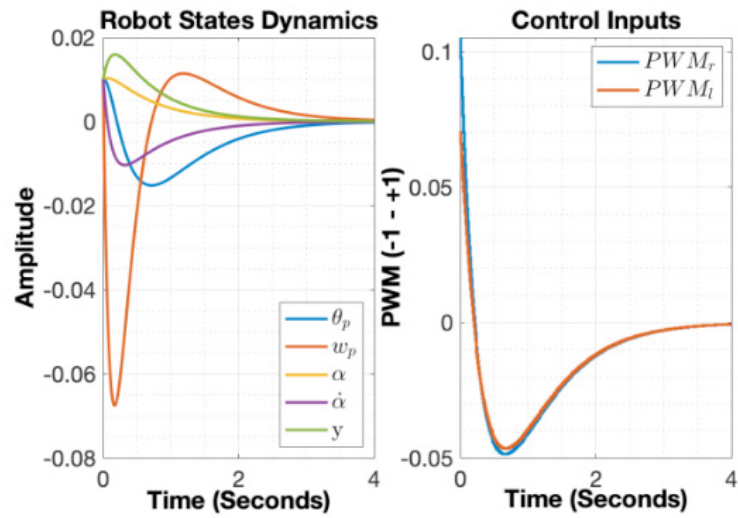


Fig. 4. Pole Placement Controller: simulation.

(Source: Author's own development)

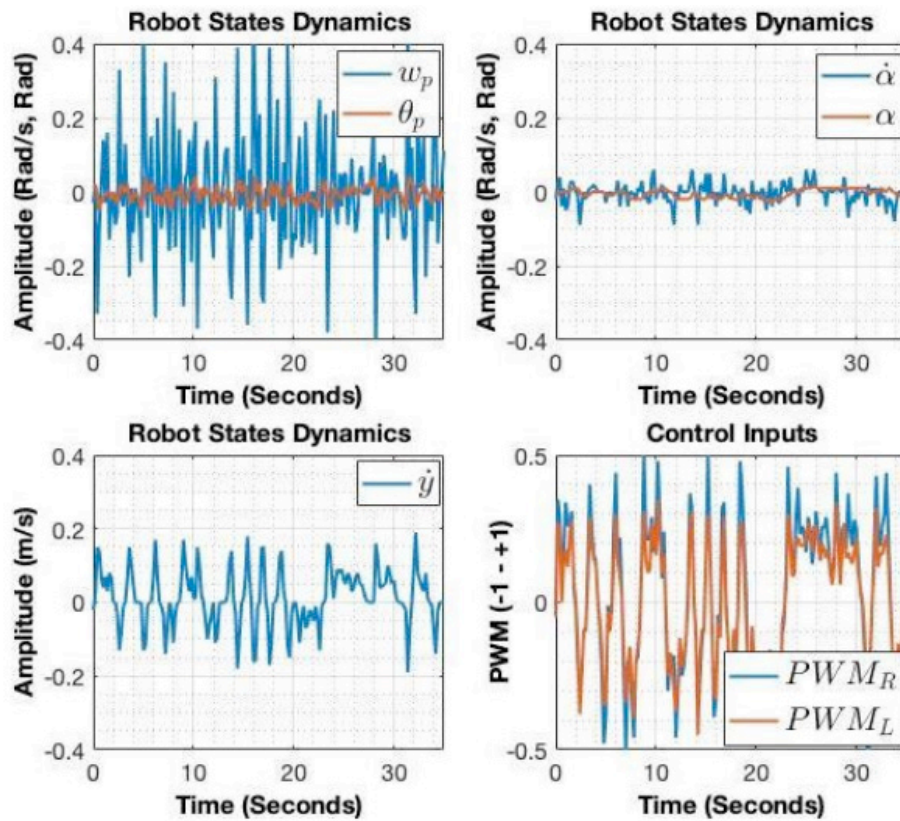


Fig. 5. Pole Placement: robot response.

(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,

$$J = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (x^T[n]Qx[n] + u^T[n]Ru[n]) \quad (22)$$

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.

$$P_{ss} = \Phi^T (P_{ss} - P_{ss} \Gamma (R + \Gamma^T P_{ss} \Gamma)^{-1} \Gamma^T P_{ss}) \Phi + Q \quad (23)$$

In this case, the stationary gain is given by (24).

$$K_{ss} = R^{-1} \Gamma^T P_{ss} \quad (24)$$

Matrices Q and R can be obtained using the Bryson rule (Fadali, 2013).

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{Maximum Acceptable Value of } x_i^2}$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\text{Maximum Acceptable Value of } u_j^2}$$

The design was based on the following limits:

$\theta_p \text{ max: } 0.01 \text{ rad}$	$\omega_p \text{ max: } 0.1 \text{ rad/s}$
$\alpha \text{ max: } 0.05 \text{ rad}$	$\dot{\alpha} \text{ max: } 0.1 \text{ rad/s}$
$y \text{ max: } 0.05 \text{ m}$	$\dot{y} \text{ max: } 0.5 \text{ m/s}$

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.

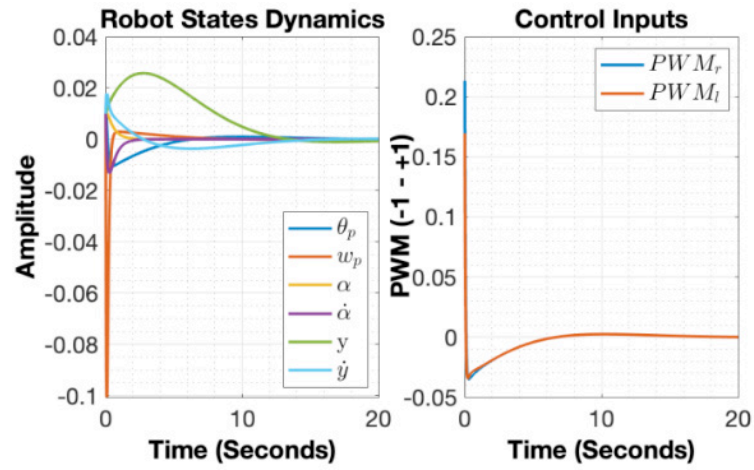


Fig. 6. LQR Controller: simulation.

(Source: Author's own development)

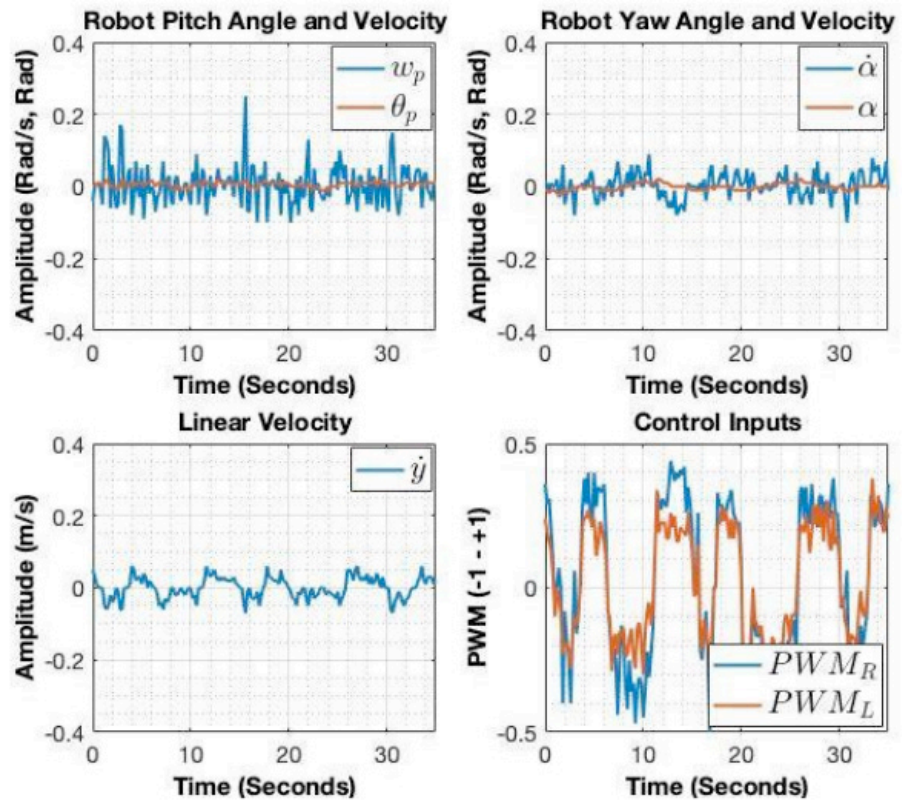
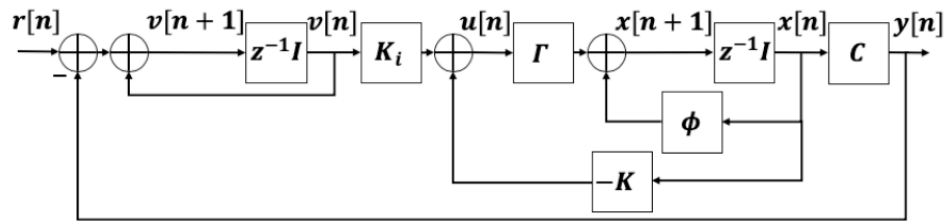


Fig. 7. LQR Controller: robot response.

(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).

$$v[n + 1] = v[n] + r[n] - y[n] \quad (25)$$

The feedback law for the augmented system results in (26),

$$\begin{bmatrix} x[n + 1] \\ v[n + 1] \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C & I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & -K_i \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x[n] \\ v[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r[n] \quad (26)$$

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.

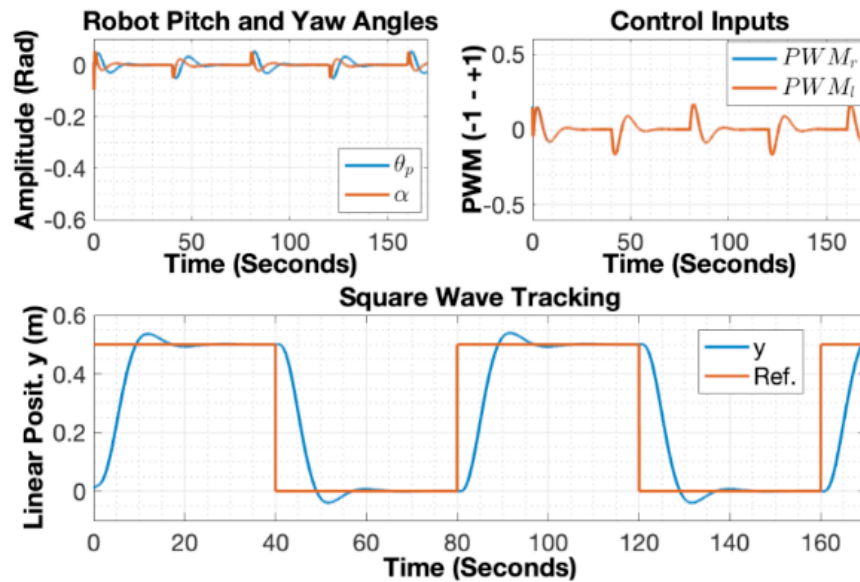


Fig. 9. Square wave tracking: simulation.
(Source: Author's own development)

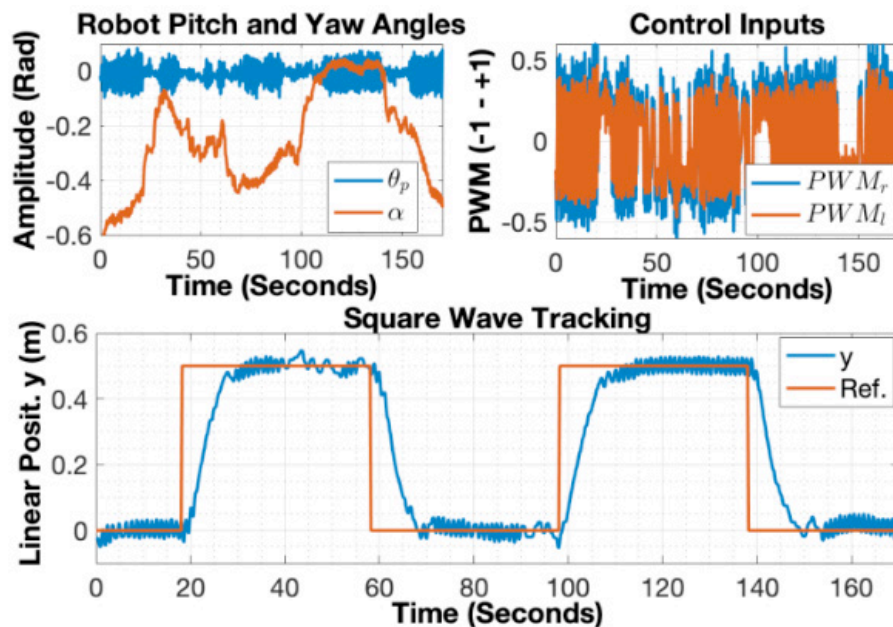


Fig. 10. Square wave tracking: robot response.
(Source: Author's own development)

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 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.

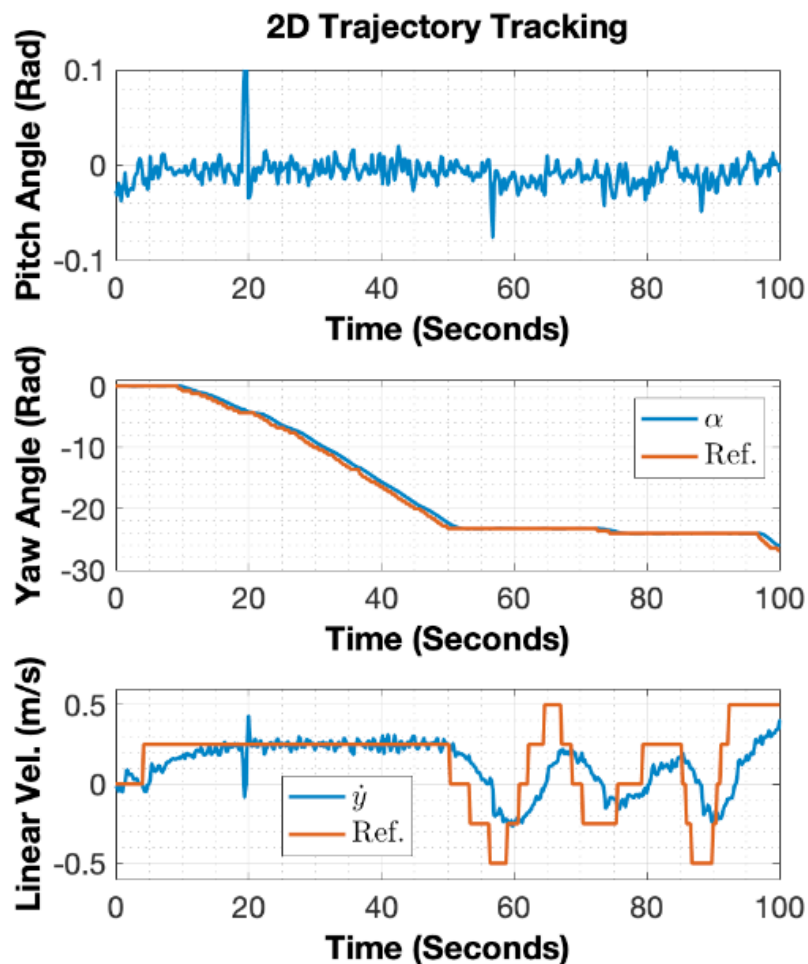


Fig. 11. Two-dimensional tracking: robot response.

(Source: Author's own development)

5 | 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

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

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

T

Tomada de decisão inteligente 58

Turbina eólica 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10

V

Válvulas automáticas industriais 95, 96

 **Atena**
Editora

2 0 2 0