

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

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. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
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. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
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. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
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
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
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
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
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
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
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
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
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 Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miraniide Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

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. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
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. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa

Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
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 Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Flávia Roberta Barão
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-133-3

DOI 10.22533/at.ed.333211706

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação 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 neste campo do conhecimento 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. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

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

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

SINCRONIZAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA HIDRÁULICA A PARTIR DA TÉCNICA DE PLL COM ACOPLAMENTO ÓTICO

Joelson Lopes da Paixão
Mauro Fonseca Rodrigues
José Oizimas Junior

DOI 10.22533/at.ed.3332117061

CAPÍTULO 2..... 15

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE NEWTON-RAPHSON E DE SOMA DE CORRENTES PARA SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Hugo Andrés Ruiz Flórez
Cristiane Lionço Zeferino
Leandro Antonio Pasa
Gloria Patricia Lopez Sepulveda
Eduarda Abatti Dahlem

DOI 10.22533/at.ed.3332117062

CAPÍTULO 3..... 29

AUTOMATED LOAD-BALANCING PROCESS ANALYSIS IN LOW-VOLTAGE GRID USING PETRI NETS

José Ruben Sicchar Vilchez
José Reinaldo Silva
Carlos Tavares da Costa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117063

CAPÍTULO 4..... 41

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DA INFLUÊNCIA DO GENERALIZED UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Ednei Luiz Miotto
Bruno Rafael Gamino
Elenilson de Vargas Fortes
Percival Bueno de Araujo
Luís Fabiano Barone Martins

DOI 10.22533/at.ed.3332117064

CAPÍTULO 5..... 55

SOLUÇÕES INOVADORAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MINIGERAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM

André Ross Borniatti
Pedro Daniel Bach Montani
Luís Eduardo Rocha Nepomuceno
Daniel Pinheiro Bernardon
Luciane Neves Canha
Lucas Thadeu Orihuela da Luz

Giuliano Bolognesi Archilli
Isabel Fighera Hartmann
Marcia Henke
Táisson Soares Graebner
Tiago Bandeira Marchesan

DOI 10.22533/at.ed.3332117065

CAPÍTULO 6..... 69

LABORATÓRIO SMART GRID: AMBIENTE CIBER-FÍSICO PARA TESTES SISTÊMICOS DE FUNCIONALIDADES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Luiz Henrique Leite Rosa
Marcio Ribeiro Cruz
Carlos Frederico Meschini Almeida
Nelson Kagan
Alexandre Dominice

DOI 10.22533/at.ed.3332117066

CAPÍTULO 7..... 82

GESTÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO CAMPUS SALVADOR: IMPLEMENTANDO AÇÕES PARA REDUZIR O CONSUMO COM A CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA

Carollina Silva de Santana
Armando Hirohumi Tanimoto

DOI 10.22533/at.ed.3332117067

CAPÍTULO 8..... 91

TRANSIENT ANALYSIS OF CLASSICAL AND MODIFIED LUMPED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL IN POWER SYSTEMS

Jaimis Sajid León Colqui
Sérgio Kurokawa
Anderson Ricardo Justo de Araújo
José Pissolato Filho

DOI 10.22533/at.ed.3332117068

CAPÍTULO 9..... 109

ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO ADAPTATIVO APLICADO NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM WAMS

Lucas Luiz Lunarti
Maury Meirelles Gouvêa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117069

CAPÍTULO 10..... 117

DESENVOLVIMENTO DE MODELO E PROTÓTIPO PARA OTIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS

Vinicius Pedroza Delsin
Antonio Newton Licciardi Junior

DOI 10.22533/at.ed.33321170610

CAPÍTULO 11	132
SÍNTESE DE UM CONTROLADOR MPC PARA O CONDICIONAMENTO DE AR DO EDIFÍCIO MODERNO	
Míriam Tvrzská de Gouvêa	
Catarina Gomes dos Santos	
Alessandro Ferreira da Silva	
José Pucci Caly	
Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa	
DOI 10.22533/at.ed.33321170611	
CAPÍTULO 12	145
SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR BASEADO EM MODELO DE HAMMERSTEIN UTILIZANDO TRILATERAÇÃO	
Almir Souza e Silva Neto	
Paulo Henrique Gonçalves Melo	
Fernando Antônio Tocantins Nunes	
DOI 10.22533/at.ed.33321170612	
CAPÍTULO 13	159
ESTUDO EXPERIMENTAL DA ARGILA KIMBERLITO DO BRASIL NA APLICAÇÃO DE ANTENAS RESSOADORAS DIELÉTRICAS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS	
Diêgo da Mota Colares	
Roterdan Fernandes Abreu	
João Paulo Costa do Nascimento	
Juscelino Chaves Sales	
Antonio Sergio Bezerra Sombra	
DOI 10.22533/at.ed.33321170613	
CAPÍTULO 14	167
LEVANTAMENTO DE NÃO CONFORMIDADES TÉRMICAS (NCT) ATRAVÉS DE ANÁLISES TERMOGRÁFICAS NA SUBESTAÇÃO FORTALEZA II DA COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO	
Fagner Leite Sales	
DOI 10.22533/at.ed.33321170614	
CAPÍTULO 15	173
EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE TUCUMÃ POR SOLVENTE UTILIZANDO ETANOL E METANOL	
Yanael Lima de Medeiros	
Mariana Silva Dorta de Melo	
Amanda Santana Peiter	
DOI 10.22533/at.ed.33321170615	
SOBRE OS ORGANIZADORES	179
ÍNDICE REMISSIVO	180

SÍNTESE DE UM CONTROLADOR MPC PARA O CONDICIONAMENTO DE AR DO EDIFÍCIO MODERNO

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

Míriam Tvrzská de Gouvêa

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia de Produção
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/0090676182871757>

Catarina Gomes dos Santos

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia de Produção
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/2138760568721880>

Alessandro Ferreira da Silva

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia Mecânica
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4333159781813651>

José Pucci Caly

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia Mecânica
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/2227125062476125>

Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Centro
de Ciência e Tecnologia
Campinas – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/7895015248377288>

Edifício Moderno, pela manipulação da abertura da válvula de expansão eletrônica e rotação do *chiller* e das frações de *bypass* de água fria para os *fancoils* que fornecem água gelada para as zonas. O controlador preditivo foi modelado como um problema da programação não linear sujeito a restrições, dentre as quais se incluem as faixas de operação da rotação do compressor e da temperatura da água que sai do evaporador. Para avaliar a operação do controlador proposto, considerou-se a sua capacidade de implementar alterações no *setpoint* das temperaturas das zonas e de rejeitar perturbações na edificação devidas a variações na ocupação e ambientais. O desempenho do controlador preditivo proposto foi comparado ao de um controlador tradicional do tipo PID sintonizado pela técnica de controle por modelo interno (IMC). Mostra-se, no trabalho, que o uso da tecnologia de controle avançado é viável para este tipo de sistema e permite controlar a operação em condições fora do projeto (*off-design*), diferentemente do que ocorre com o controlador PID. Contudo, o procedimento de sintonia do controlador preditivo não é trivial e alguns cenários simulados mostram a necessidade de uma melhoria na sintonia. Este estudo foi realizado por simulações da planta virtual do Edifício Moderno no ambiente de programação do simulador MATLAB® R2006b.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Preditivo. Ar condicionado. PID-IMC.

RESUMO: Este trabalho apresenta a síntese de um controlador preditivo para controlar a temperatura de operação de 35 zonas do

SYNTHESIS OF A MPC CONTROLLER FOR THE AIR CONDITIONING SYSTEM OF EDIFÍCIO MODERNO

ABSTRACT: This work presents the synthesis of a predictive controller that controls the operating temperatures of 35 zones of Edifício Moderno by manipulating the opening of the electronic expansion valve and the rotation of the compressor of the chiller and the water bypass fraction to each fancoil used to control the air temperature of each zone. The predictive controller was modeled as a nonlinear programming problem subjected to constraints, including operational bounds on the rotation of the compressor and bounds on the temperature of the cold water from the evaporator. In order to evaluate the operation of the controller, the setpoint tracking capability of the controller was analyzed as well as its capacity to reject disturbances due to variations in thermal occupancy load and ambient external conditions. The performance of the proposed controller was compared with a traditional PID controller tuned by the IMC technique. It is shown that the usage of the proposed advanced control technology is viable for this kind of system and enables controlling off-design conditions, differently from what happens with the PID controller. However, the tuning procedure of the predictive controller is not trivial and some scenarios show the necessity of improving the tuning. For this study, simulations of the virtual plant of Edifício Moderno were performed using MATLAB® R2006b.

KEYWORDS: Model Predictive Control. Air conditioning. PID-IMC.

1 | INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente está tornando cada vez mais relevante a redução do consumo de energia elétrica nos sistemas de climatização em edifícios. Considera-se que quase 50% da demanda de energia em edificações comerciais servem para suportar condições de conforto térmico interno e, em países desenvolvidos, sistemas de climatização consomem de 10% a 20% da energia total do país (ALI, 2013). No Brasil, em 2017, o consumo de energia elétrica alcançou o patamar de 528 TWh, sendo o consumo estimado de energia correspondente aos condicionadores de ar em residências de 18,7 TWh e estima-se que em 2035 irá para 48,5 TWh, um crescimento de 5,4% ao ano (EPE, 2018). Estes dados evidenciam que é preciso aderir às políticas de eficiência energética com estratégias de controle de processo apropriadas.

Para Caiado (2016) os principais desafios da eficiência energética são: a falta de prioridade para esse aspecto nas empresas; gestores incapazes de entender os benefícios da eficiência energética tanto no contexto de economia de riqueza quanto no ganho social; e a dificuldade em conscientizar indivíduos que nunca tiveram contato com esse tipo de política.

Para sistemas de ar condicionado já existentes, a melhoria da eficiência energética pode ser alcançada pela implementação de estratégias de controle avançado e/ou de otimização que permite a redução do consumo de energia, a detecção de erros e a realização de diagnósticos (ZHAO & YU, 2017). O emprego de técnicas de controle avançado no setor de ar condicionado é, no entanto, ainda incipiente (KILLIAN & KOZEK,

2016; ZHAO & YU, 2017).

Neste trabalho, apresenta-se um controlador preditivo baseado em modelos (MPC) sintetizado para controlar a operação de 35 zonas do Edifício Moderno, cujo desempenho foi comparado com o de um controlador PID convencional sintonizado pela técnica IMC.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

O sistema de ar condicionado do Edifício Moderno foi concebido por Araújo (2016). O Edifício Moderno é uma edificação de grande porte localizada na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. O sistema de ar condicionado atende uma área de 19193,4 m² e considerou-se no projeto do sistema de ar condicionado apenas o controle da temperatura sem levar em consideração o controle da umidade relativa, prática comum que visa à redução de custos fixos. O condicionamento do ar no Edifício Moderno é realizado por um sistema de ar condicionado central do tipo ar-água, que é um dos tipos de sistemas de ar condicionado mais eficaz que existe (ZHAO & YU, 2017). O projeto do sistema de ar condicionado do tipo ar-água foi dimensionado por Araújo (2016) por meio do software de simulação comercial *Hourly Analysis Program* (HAP) ® 5.10. O projeto contempla o uso de 3 *chillers* para fornecer água gelada para *fancoils* que fornecem ar frio a ser insuflado nas diversas zonas do edifício. Cada *chiller* tem carga nominal de 1064,4 kW.

Pellegrini *et al.* (2018) propuseram um modelo matemático para representar a operação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno, elaborando um simulador de processos no ambiente de programação do MATLAB®. Salienta-se que Pellegrini *et al.* (2018) elaboraram um modelo parcial do edifício completo que contempla a operação de um *chiller* que fornece água fria a 35 *fancoils*, sendo que cada *fancoil* fornece ar frio a uma grande zona. No modelo de Pellegrini *et al.* (2018), as zonas foram modeladas como regiões homogêneas que recebem uma vazão constante de ar frio. Ou seja, a temperatura da corrente de ar varia de modo a controlar a temperatura do ar nas zonas. Água gelada proveniente dos *chillers* é enviada para os *fancoils* onde ocorrerá o resfriamento do ar. Na entrada de cada *fancoil*, há uma válvula de três vias e por meio do controle do *bypass* de água é possível controlar a temperatura da corrente de ar das zonas que entra em cada *fancoil*.

O modelo de capacitância global proposto por Pellegrini *et al.* (2018) para a modelagem das zonas foi aprimorado, neste trabalho, como apresentado na Equação (1). A carga térmica de equipamentos, iluminação e de ocupação das pessoas foi arbitrada como sendo 40% da carga térmica total de cada zona projetada por Araújo (2016). Outros pormenores sobre o modelo matemático que representa a operação do Edifício Moderno podem ser obtidos em Pellegrini *et al.* (2018).

$$\frac{dT_{ret}}{dt} = \frac{\dot{m}_{ar}(c_{p_{AS}} + ua \cdot c_{p_{va}})(T_{in} - T_{ret}) + U_z A_z (BS - T_{ret}) + q_z}{m_z (c_{v_{AS}} + ua \cdot c_{v_{va}})} \quad (1)$$

Em que:

\dot{m}_{ar} = Vazão mássica de ar insuflado na zona (kg/s)

cp_{AS} = Calor específico a pressão constante para o ar seco (kJ/kgK)

ua = Umidade absoluta do ar insuflado (kg de água/kg de ar seco)

cp_{va} = Calor específico a pressão constante para o vapor de água (kJ/kgK)

T_{in} = Temperatura da corrente de ar insuflada (K)

T_{ret} = Temperatura da corrente de ar de retorno (K)

q_z = Carga térmica devida a equipamentos, iluminação e às pessoas (kW)

m_z = Massa de ar na zona (kg)

cv_{AS} = Calor específico a volume constante para o ar seco (kJ/kgK)

cv_{va} = Calor específico a volume constante para o vapor de água (kJ/kgK)

U_z = Coeficiente global de troca térmica entre a zona e o ambiente externo (W/(m²·K))

A_z = Área de troca térmica através das paredes da zona (m²)

BS = Temperatura de bulbo seco do ar ambiente externo (K)

Pode-se assegurar as condições ambientais em diversas zonas através da manipulação de algumas variáveis chamadas, na teoria de controle, de variáveis manipuladas, que são ajustadas pelo controlador para minimizar os erros entre as medições das variáveis controladas e o valor referencial. Essa forma de controle corresponde ao conceito de controle por retroalimentação. Controladores do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) são ainda hoje amplamente utilizados em sistemas modernos de controle de ar condicionado porque são simples, de fácil implementação e usualmente de forte robustez (ZHAO & YU, 2017). Uma forma tradicional de se equacionar controladores analógicos PID é apresentada pela Equação (2). Observa-se nesta equação, que a ação de controle (Δu) é proporcional ao erro ($e(t_a)$) avaliado num instante t_a , à integral do erro e à derivada do erro. Nesta equação, os parâmetros K_c , τ_i e τ_d são os parâmetros sintonizáveis do controlador PID, sendo, respectivamente, denominados de ganho proporcional, integral e derivativo que devem ser estabelecidos na etapa de síntese do controlador. O erro é definido como sendo a diferença entre a medida da variável que se quer controlar e o valor desejado para ela, chamado de valor de referência ou *setpoint*. A ação de controle é normalmente definida como sendo a variável manipulada menos um valor de referência, o qual pode ser, por exemplo, o valor da variável no ponto nominal de projeto.

$$\Delta u = K_c \left(e(t_a) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^{t'} e(t) dt + \tau_d \left. \frac{de}{dt} \right|_{t=\tau_d} \right) \quad (2)$$

Dentre os procedimentos de sintonia desenvolvidos para os controladores PID,

destaca-se a metodologia de síntese baseada nos Controladores de Modelo Interno (IMC) proposta por Garcia e Morari (1982). Nesse método o primeiro passo é identificar um modelo linear do processo e depois, empregando-se a metodologia de sintonia IMC obtêm-se os parâmetros do controlador. No segmento de ar condicionado, essa técnica passou a ser utilizada recentemente para controle da temperatura e da umidade em uma zona (XIAOCHEN & CHUNXUAN, 2014). O procedimento de obtenção dos parâmetros do controlador PID pela técnica IMC é bem documentado na literatura para modelos simples identificados do processo (SEBORG, 2004). Para modelos identificados de 1ª ordem, as constantes proporcional e integral do controlador são calculadas, respectivamente como $\frac{\tau}{K\lambda}$ e τ , sendo τ a constante de tempo do modelo de 1ª ordem, K o ganho do modelo e λ o parâmetro de sintonia do controlador (SEBORG, 2004). A metodologia IMC para a síntese de controladores PID consiste assim, na identificação de um modelo de ordem baixa, como um modelo de 1ª ordem. Para este, a etapa de identificação do modelo corresponde à determinação dos parâmetros K e τ . Estabelecidos estes, obtêm-se os parâmetros do controlador PID em função do parâmetro ajustável λ . Simulam-se as respostas em malha fechada, determinando-se o valor do parâmetro λ que fornece o desempenho considerado adequado.

Controladores preditivos, usualmente representados pela sigla MPC (*Model Predictive Control*) são estratégias de controle avançado que fazem uso de um modelo matemático para a predição de erros futuros entre as variáveis controladas e seus *setpoints*, os quais são minimizados pela predição de como se deve manipular o processo, tendo, usualmente, um melhor desempenho do que as estratégias convencionais de controle como os controladores PID (ZHAO & YU, 2017). Existem muitas formulações de controladores preditivos. As diferenças residem tanto na proposta da função objetivo que se será minimizada para o cálculo das ações de controle, como na estrutura do modelo de predição. Empregam-se, em geral, modelos lineares identificados do processo de baixa ordem. Algumas variáveis podem ser controladas por faixas, enquanto outras são controladas em *setpoints* fixos. Tanto as variáveis manipuladas, como as ações de controle e variáveis controladas ou monitoradas são sujeitas a restrições de limites. Há formulações em que o efeito de distúrbios é incorporado nas predições e também existem controladores MPC que incorporam na função objetivo do controlador, parâmetros econômicos associados, normalmente, a variáveis que medem o consumo energético no processo. O controlador MPC proposto neste trabalho é descrito no item de Metodologia.

3 | METODOLOGIA

Para a síntese dos controladores PID e MPC, procedeu-se, inicialmente, com a identificação de modelos lineares de 1ª ordem adequados, tanto à formulação do controlador MPC proposto neste trabalho, como para a aplicação do procedimento de sintonia do

controlador PID pela técnica IMC. Optou-se pela representação do modelo de 1ª ordem no domínio do tempo como apresentado na Equação (3).

$$T_i(t) = K_{i,bp} M_{i,bp} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,bp}}}\right) + K_{i,eev} M_{i,eev} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,eev}}}\right) + K_{i,rpm} M_{i,rpm} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,rpm}}}\right) \quad (3)$$

Em que:

$T_i(t)$ = Variável controlada num instante t menos o seu valor de referência, podendo ser a temperatura do ar de cada zona (T_z) ou a temperatura da água na saída do evaporador (T_{ag}).

$K_{i,bp}$, $K_{i,eev}$, $K_{i,rpm}$ = Ganhos do processo, sendo $i = z$ ou ag

$M_{i,bp}$, $M_{i,eev}$, $M_{i,rpm}$ = Magnitude da perturbação aplicada na variável manipulada, sendo $i = z$ ou ag

t = Instante de tempo

$\tau_{i,bp}$, $\tau_{i,eev}$, $\tau_{i,rpm}$ = Constante de tempo do modelo de 1ª ordem, sendo $i = z$ ou ag

Para a obtenção dos ganhos de processo e constantes de tempo, aplicaram-se perturbações em degrau separadamente em cada variável manipulada e a partir das respostas, os modelos foram identificados, minimizando-se a integral do erro quadrático (ISE) entre a resposta do processo e aquela predita pelo modelo de 1ª ordem.

Os ganhos e constantes de tempo identificados neste trabalho foram empregados para se obter os parâmetros do controlador PID, conforme procedimento descrito no referencial teórico. Os valores do parâmetro ajustável λ usados para a determinação dos parâmetros do controlador foram de 100 e 2000, respectivamente, para a malha de controle da água na saída do evaporador e para as malhas de controle das temperaturas de ar nas zonas.

Tanto o controlador PID, como o MPC desenvolvido neste trabalho foram incorporados ao simulador desenvolvido por Pellegrini *et al.* (2018) no ambiente de simulação do MATLAB® R2006b. Neste trabalho, empregaram-se os mesmos métodos numéricos usados por Pellegrini *et al.* (2018) para simular o modelo matemático, a saber, o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução das equações diferenciais ordinárias com passo de integração máximo de 1 segundo e o método de Programação Quadrática Sucessiva (SQP) para a resolução de sistemas de equações algébricas não lineares e para a resolução do problema de otimização do controlador preditivo.

Considerou-se para a função objetivo do controlador MPC a Equação (4), a qual foi adaptada da proposta de Wallace *et al.* (2012). A primeira parcela tem a função de minimizar o erro quadrático ponderado pelo parâmetro a_i , entre as predições da temperatura do ar das 35 zonas e seus valores de referência. A segunda parcela é para suavizar as ações, objetivando a estabilização do controlador, evitando-se mudanças bruscas no sistema e a última parcela, adaptada de Wallace *et al.* (2012) visa eliminar o *offset*, tendo assim uma

função semelhante à ação integral dos controladores PID. São, desta forma parâmetros de sintonia do controlador MPC: ρ , α_p , γ_i e δ_p , além do período de intervenção, denotado como T_s neste trabalho. Este último corresponde ao intervalo de tempo transcorrido entre as chamadas do controlador MPC.

$$\min_{\Delta u(k)} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{nc} \alpha_i (y_i(k) - y_i^{sp} + erro_{pr,i})^2 + \sum_{i=1}^{nu} \gamma_i \Delta u_i^2 + \sum_{i=1}^{nc} \delta erro_{ac,i} \quad (4)$$

Em que:

p = Horizonte de predição, corresponde ao número de instantes futuros em que as variáveis controladas são preditas (s)

nc = Número de variáveis controladas

nu = Número de variáveis manipuladas

$y_i(k)$ = Resposta da variável predita pelo modelo linear para a temperatura da zona no instante ($^{\circ}\text{C}$) conforme o modelo dado pela Equação (3)

y_i^{sp} = Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$) para a $i^{\text{ésima}}$ variável controlada

Δu_i^2 = Variação na $i^{\text{ésima}}$ variável manipulada

α , γ , δ = Parâmetros de sintonia do controlador

$erro_{pr,i}$ = erro entre o valor predito para o instante atual e o valor medido da variável calculada

$erro_{ac,i}$ = erro acumulado para cada variável controlada i . Ou seja, a cada instante em que as ações de controle são calculadas, acrescenta-se ao erro acumulado a diferença entre o valor medido da variável controlada e o seu *setpoint*.

Observando-se a Equação (4), percebe-se que para se minimizar a função objetivo, calculam-se as ações de controle. Ao problema de otimização do controlador MPC, incorporam-se também restrições, tendo sido restringidas as ações de controle e as variações nas ações de controle entre valores mínimos e máximos. Desta forma, limitações físicas não são violadas e são levadas em conta pelo controlador. As frações de *bypass* foram limitadas entre os seus limites físicos, ou seja, entre 0 e 1. A fração de abertura da EEV foi limitada entre 0,4 e 1 e a rotação foi limitada entre 40 e 60 Hz. Limitou-se o valor mínimo da EEV de modo a não propiciar uma redução do superaquecimento do fluido refrigerante na saída da evaporadora, o que poderia ocasionar a presença de líquido na entrada do compressor, comprometendo a sua integridade física. Os valores empregados para se limitar as ações de controle são documentados no item de resultados. Adicionalmente, limitaram-se os valores para a temperatura da água na saída do evaporador. Algumas razões justificam este procedimento. Diferentemente de uma prática comum de se controlar a temperatura da água em um valor fixo como feito, por exemplo, por Wallace *et al.* (2012), optou-se por deixar esta variável livre de modo que o controlador tivesse

graus de liberdade para se adaptar a diferentes condições operacionais do sistema de ar condicionado, inclusive a condições *off-design* (fora de projeto). Desta forma, para se evitar o congelamento da água ou valores de temperatura da água que ocasionariam a existência de líquido refrigerante na entrada do compressor, limitaram-se valores da temperatura da água em dois instantes de tempo k , quais sejam, no 1º instante futuro e no $p^{\text{ésimo}}$ instante futuro predito pelo controlador a partir de cada chamada do mesmo. Os limites máximos e mínimos adotados no trabalho foram 6,9°C ou 6,7°C e 5,5°C.

Após concluir a programação do controlador, efetuaram-se simulações em malha fechada para observar os resultados do controlador proposto, variando-se seus parâmetros de sintonia. As respostas dos controladores PID e MPC foram comparadas. Os resultados foram organizados na forma de gráficos, em que podem ser avaliadas as variáveis de interesse e a capacidade de controle do sistema pelos dois controladores PID e MPC.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros identificados dos modelos de 1ª ordem e as amplitudes das perturbações em degrau aplicadas ao simulador do Edifício Moderno para a obtenção dos parâmetros são apresentados na Tabela 1.

parâmetro/ índice i	z, bp	z, eev	z, rpm	a, bp	a, eev	a, rpm
K_i	-2,7928	0,3197	-0,0476	-6,4199	-0,0740	-0,1093
τ_i	539,8	569,6	543,8	186,4	4	191,6
M_i	0,018	0,1	1,5	0,018	0,1	1,5

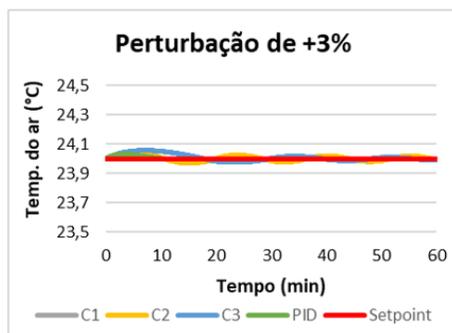
Tabela 1 – Parâmetros dos modelos de 1ª ordem identificados e amplitudes dos degraus aplicados

O período de intervenção dos controladores digitais é de 30s. As constantes proporcional e integral do controlador PID-IMC de temperatura da água na saída do evaporador são, respectivamente, 0,29035 e 37,28, enquanto que para cada malha de temperatura de ar da zona, são, respectivamente -0,8907 e 113,92. Os parâmetros de sintonia associados à função objetivo do controlador MPC empregados foram: $\alpha = 10^7$, $\gamma_{\text{bypass}} = 0$, $\gamma_{\text{EEV}} = \gamma_{\text{rotação}} = \delta = 10^3$. Ainda, para a sintonia do controlador MPC efetuaram-se várias simulações com parâmetros de sintonia diferentes. Na Tabela 2 apresentam-se três conjuntos de parâmetros de sintonia usados para avaliar o desempenho do controlador MPC.

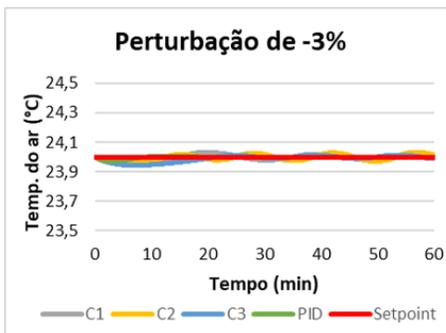
Conjunto	p	$\Delta u_{bypass_{max}}$	$\Delta u_{EEV_{max}}$	$\Delta u_{rotação_{max}}$	Tag_{min}	Tag_{max}
C1	45	0,002	0,002	0,02	5,5	6,9
C2	40	0,004	0,004	0,04	5,5	6,7
C3	15	0,002	0,002	0,02	5,5	6,7

Tabela 2 – Parâmetros para sintonia do MPC

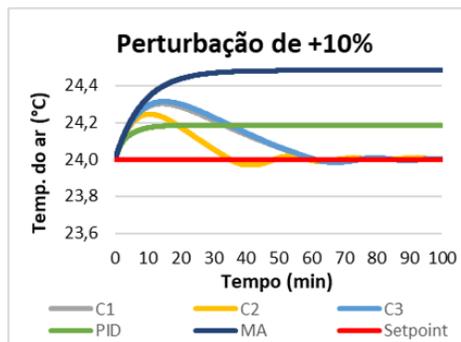
Para as simulações do comportamento do sistema em malha fechada, consideraram-se três cenários. No primeiro, foram feitas perturbações de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$ na carga térmica gerada por equipamentos, iluminação e pessoas. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas foi mantido em 24°C . No controlador PID, o *setpoint* da água do evaporador foi mantido no valor de projeto em $6,7^{\circ}\text{C}$. Os resultados da temperatura do ar nas zonas para perturbações de $\pm 3\%$ são mostrados na Figura 1 (a) e na Figura 1 (b) e as de $\pm 10\%$ na Figura 1 (c) e Figura 1 (d).



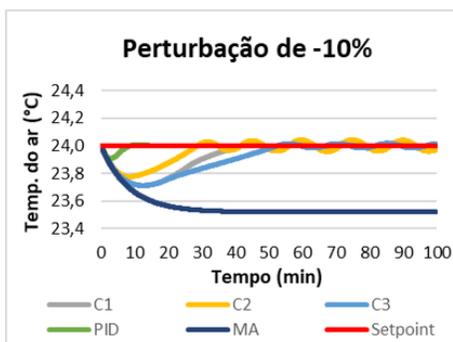
(a)



(b)



(c)



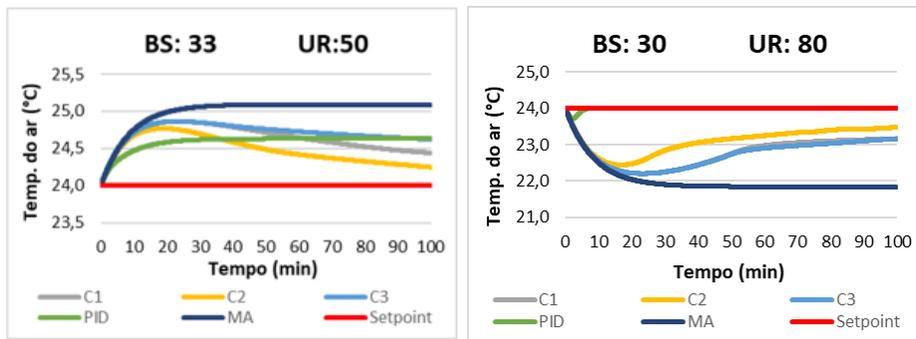
(d)

Figura 1 – Temperatura da água com perturbações devidas à ocupação nas zonas de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$

Observando-se a Figura 1, percebe-se que os controladores MPC e PID conseguem

acomodar as perturbações de $\pm 3\%$ e de -10% na carga térmica devidas à ocupação e apenas o controlador MPC consegue manter as zonas na temperatura especificada para a perturbação *off-design* de $+10\%$. Embora, observam-se oscilações nas respostas do controlador preditivo sintonizado de diferentes formas, que parecem sugerir que a operação esteja no limite de estabilidade, deve-se atentar para a pequena variação no valor da temperatura das zonas. As oscilações devem, assim, ser devidas a problemas numéricos e não a questões de estabilidade do controlador. Percebe-se que o projeto do sistema de ar condicionado foi feito a naturalmente rejeitar pequenas perturbações na ocupação. Os parâmetros de sintonia do controlador MPC apresentados visaram minimizar oscilações e assim levaram a respostas relativamente lentas, contudo a máxima amplitude de variação da temperatura ocorreu nos primeiros 20 min de operação, sendo inferior a $0,4^{\circ}\text{C}$, valor este aceitável.

No segundo cenário foi avaliado o efeito das condições ambientais no desempenho do sistema de ar condicionado. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas também foi mantido em 24°C e para o controlador PID, manteve-se o *setpoint* da água do evaporador em $6,7^{\circ}\text{C}$. Para isso foram consideradas duas situações, uma em que a temperatura de bulbo seco do ar ambiente é de 33°C com uma umidade relativa de 50% e outra em que a temperatura de bulbo seco é 30°C com a umidade relativa de 80% . Ambas as condições correspondem a dias em que a entalpia específica do ar é superior à da condição de projeto. O primeiro caso considerado é relacionado a um dia que estará mais quente e menos úmido que o dia considerado como sendo a pior situação no ano no projeto e, no segundo caso, tem-se um dia quente com uma temperatura elevada, mas inferior à do projeto e muito úmido. É um dia que causa uma sensação térmica bastante desagradável, sendo desejável o condicionamento das zonas. Os resultados da temperatura do ar na situação de 33°C com 50% de umidade é apresentado na Figura 2 (a) e na situação de 30°C e 80% de umidade na Figura 2 (b). São apresentadas, também nas figuras, as respostas em malha aberta e as respostas para os dois controladores. Para a condição de temperatura externa de 33°C e 50% de umidade relativa, o controlador PID parece estabilizar em torno de $24,6^{\circ}\text{C}$ enquanto os controladores MPC continuam diminuindo a temperatura, estabilizando-a em torno de $24,2^{\circ}\text{C}$. Na condição de 30°C e 80% de umidade relativa, o PID se mostra bem mais rápido e estabiliza em 24°C enquanto o MPC vai estabilizando com temperaturas mais baixas em torno de $23,4^{\circ}\text{C}$ após 80 minutos. A abertura da EEV e a rotação do compressor encontram-se em seus limites para este cenário, o que juntamente com a dinâmica lenta e ganhos pequenos das zonas, pode contribuir para esta queda de desempenho.

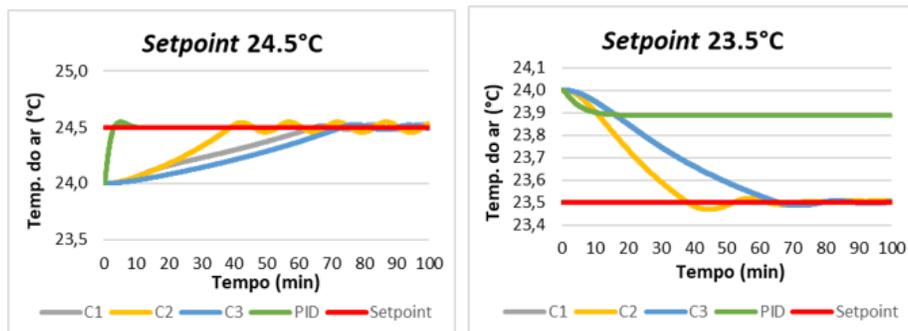


(a)

(b)

Figura 2 – Temperatura do ar frente às perturbações nas condições ambientais

Para o terceiro cenário foi feita uma mudança na temperatura de *setpoint* do ar de 24°C para 23,5°C e 24,5°C. Objetivou-se verificar a capacidade dos controladores de atenderem a demandas de variação dos *setpoints* das zonas. Os resultados da temperatura do ar nas zonas são mostrados na Figura 3 (a) e na Figura 3 (b). Na mudança de *setpoint* para 24,5°C pode-se observar que o PID estabiliza rapidamente atingindo a temperatura de *setpoint* e o MPC tem uma resposta mais lenta, mas consegue alcançar os 24,5°C. Já na mudança para 23,5°C observa-se que o PID não consegue atender a demanda de variação e estabiliza em 23,9°C enquanto o MPC atinge os 23,5°C em torno de 1 hora.



(a)

(b)

Figura 3 - Temperatura do ar nas zonas com mudanças no *setpoint*

Com relação à análise comparativa das três sintonias empregadas para o controlador preditivo, percebe-se que o horizonte de controle de 15 não é suficiente. Isto faz sentido porque tendo-se em mente o período de amostragem de 30s, não se alcança o tempo de estabilização previsto pelas constantes de tempo do processo. Comparando-se os horizontes de predição de 40 e 45, percebe-se que o horizonte de controle de 40 promove

a estabilização necessária. Salienta-se que na estrutura do controlador proposto neste trabalho, não se incorporou a predição de distúrbios medidos e assim, espera-se poder melhorar o desempenho do atual controlador, incorporando-se modelos de predição do efeito da variação da ocupação e das condições ambientais. Finalmente, ressalta-se que o período de amostragem grande de 30s possibilita a execução do controlador preditivo e reduz o número de manipulações no processo, minimizando-se o desgaste dos elementos finais de controle.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, mostrou-se a síntese de um controlador MPC para o controle da temperatura em 35 zonas climatizadas por um sistema de ar condicionado de uma edificação comercial de grande porte chamada de Edifício Moderno. Estruturou-se o controlador preditivo como um problema da programação não linear e restrições operacionais foram explicitamente modeladas. O controlador foi configurado para controlar 35 temperaturas das zonas em *setpoints* fixos e a temperatura da água do evaporador por faixas, manipulando 37 variáveis simultaneamente. O desempenho simulado do controlador MPC proposto foi comparado ao do controlador PID, sintonizado pela técnica IMC. As simulações foram feitas empregando-se a modelagem do Edifício Moderno proposta por Pellegrini *et al.* (2018).

Os resultados mostram que o controlador preditivo desempenhou-se adequadamente para todas as situações a que foi exposto, inclusive condições fora de projeto, diferentemente do controlador PID que não conseguiu acomodar grandes perturbações na ocupação ou nas condições ambientais. As simulações mostram também que há espaço para se melhorar a sintonia do controlador preditivo. A enorme quantidade de parâmetros sintonizáveis do controlador preditivo torna a sua síntese um processo que não é trivial.

REFERÊNCIAS

ALI, M.; VUKOVIC, V.; SAHIR, M. H.; FONTANELLA, G. **Energy analysis of chilled water system configuration using simulation based optimization.** Energy and Building, [S.l.], v.59, p. 111-112, 2013.

ARAÚJO, N. M. **Estudo comparativo do projeto de um sistema VRF com um sistema ar-água para o condicionamento de ar em um edifício comercial de grande porte.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

CAIADO, L. **Desafios da eficiência energética no Brasil.** Disponível em: <<https://cebds.org/desafios-eficiencia-energetica-no-brasil/#.XoPT-4hKjIU>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** EPE, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GARCIA, C. E.; MORARI, M. **Internal Model Control I: A unifying review and some new results.** Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., [S.I.], v. 21, n.21, p. 308-323, 1982.

KILLIAN, M.; KOZEK, M. **Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings.** Buildings and Environment, [S.I.], v. 105, p. 403-412, 2016.

PELLEGRINI, R.L.S; DE ARAÚJO, N.M.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. **Modelling a water-air conditioning system of a large commercial building for energy consumption evaluation.** Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, v. 44, Part C, p. 1963-1968, 2018

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control.** 2nd ed., NJ: John Wiley & Sons, 2004. 736 p.

XIAOCHEN, Z.; CHUNXUAN, Y. **Multivariable IMC-PID within air-conditioned room temperature and relative humidity control system.** In: 33rd. CHINESE CONTROL CONFERENCE., p. 3609-3613. Nanjing, 2014, Proceedings.

WALLACE, M.; McBRIDE, R.; AUMI, S.; MHASKAR, P.; HOUSE, J.; SLASBURY, T. **Energy efficient model predictive building temperature control.** Chemical Engineering Science, [S.I.], v. 69, p. 45-58, 2012.

ZHAO, Z.; YU, N. **The application of advanced control technologies in air conditioning system – a review.** Advances in Building Energy Research, [S.I.], v.11, n. 1, p. 52-66, 2017.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Algoritmo evolucionário adaptativo 109, 112, 113
Antenas 159, 160, 161, 164
Ar condicionado 87, 88, 132, 133, 134, 135, 136, 139, 141, 143
Automação avançada da distribuição 69

B

Balanceamento de carga nas fases 29
Biocombustível 173, 178

C

Ciber-físico 69, 73, 80
Consumo de energia elétrica 40, 56, 59, 62, 82, 85, 117, 133
Controladores suplementares 41, 47, 51, 52
Controle preditivo 132

D

DRA 159, 160, 161, 163, 165

E

Eficiência energética 55, 56, 57, 59, 61, 65, 67, 68, 82, 90, 117, 119, 130, 133, 143
Emulador de redes 69, 70, 71, 72, 79, 81
Estabilidade a pequenas perturbações 41, 42, 48
Estabilizadores de sistema de potência 41, 42
Estimação de estados 109, 110, 111, 115

F

Fluxo de potência 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 54, 72, 73, 113

G

Generalize unified power flow controller 41, 42
Gestão da energia 68, 82, 84, 88, 90
Gestão de energia elétrica 56

H

Hardware-in-the-loop 69, 72

M

Manutenção 2, 41, 118, 126, 128, 167, 168, 169, 170, 171, 172

Método de Newton-Raphson 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 26

Método de soma de correntes 15, 19

Método PLL 1

Micro-ondas 159, 160, 162, 165

Modelo de Hammerstein 145, 149

O

Óleo vegetal 173

Otimização 41, 42, 59, 61, 84, 117, 119, 121, 127, 130, 133, 137, 138

Otimização por enxame de partículas 41

P

PID-IMC 132, 133, 139

Placa fotovoltaica 117, 119, 120, 121, 122, 126, 128

PMU 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116

R

Recursos públicos 56

Redes de petri hierárquicas temporizadas 29

S

Simulações de sincronismo 1

Sincronização de geração distribuída 1

Sistema de localização indoor 145

Sistema elétrico 1, 2, 3, 14, 27, 41, 109, 110, 111, 113, 114, 115, 167, 170, 172

Sistemas de distribuição de energia elétrica 15

Sistemas elétricos 2, 14, 16, 41, 70, 72, 109, 111, 115

Smart grids 29, 69, 81

Sohxlet 173

Sustentabilidade 59, 82, 83, 85, 90, 117, 130

T

Termografia 167, 169, 172

Termovisor 167

Transformadas de Clarke e Park 1, 3

Trilateração 145, 147, 148, 149, 154

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 **Atena**
Editora
Ano 2021