

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

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
Prof^ª Dr^ª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof^ª Dr^ª 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. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Ivone Goulart Lopes – Instituto Internazionele 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
Prof^ª Dr^ª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^ª Dr^ª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof^ª Dr^ª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª Dr^ª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^ª Dr^ª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^ª Dr^ª 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 Alfnas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof^ª Dr^ª 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

Prof^ª Dr^ª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª Dr^ª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof^ª Dr^ª 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

Prof^ª Dr^ª 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

Prof^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^ª Dr^ª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci 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

Prof^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^ª Dr^ª 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. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^ª Dr^ª 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. 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
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 Miranilde 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
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
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. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Ma. 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. 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
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/UFPA
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 Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Ma. Lilians Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª Lívia 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
Prof^ª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Prof^ª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª 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
Prof^ª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof^ª Dr^ª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Prof^ª 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
Prof^ª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Prof^ª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof^ª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Prof^ª 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

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Mariane Aparecida Freitas
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 / 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 978-65-5706-773-4
DOI 10.22533/at.ed.734212202

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

METODOLOGIA PARA TESTE E CLASSIFICAÇÃO DE SMART METERS PARA APLICAÇÕES EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Luiz Henrique Leite Rosa
Renan Corrêa de Moura
Marcio Ribeiro Cruz
Carlos Frederico Meschini Almeida
Nelson Kagan
Alexandre Dominice

DOI 10.22533/at.ed.7342122021

CAPÍTULO 2..... 13

ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES

Pedro Henrique Camargos
Ricardo Elias Caetano
Marcel Fernando da Costa Parentoni

DOI 10.22533/at.ed.7342122022

CAPÍTULO 3..... 25

COMO ATENUAR EMI EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Rogério Martins de Souza

DOI 10.22533/at.ed.7342122023

CAPÍTULO 4..... 39

MODELO MATEMÁTICO DE UMA TURBINA A GÁS DE 106 MW DE TIPO INDUSTRIAL COM UM ÚNICO EIXO

Manuel Arturo Rendón Maldonado
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

DOI 10.22533/at.ed.7342122024

CAPÍTULO 5..... 54

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS - UMA ABORDAGEM USANDO SAMPLED VALUES

Matheus Felipe Ayello Leite
Arthur Augusto Pereira Cruz
Angelo Cesar Colombini
Márcio Zamboti Fortes
Yona Lopes

DOI 10.22533/at.ed.7342122025

CAPÍTULO 6..... 71

O USO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DIANTE DAS RECLAMAÇÕES POR DANOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento
Lilian de Fátima Costa Santos

Roberto Akira Yamachita
Jamil Haddad
Rodolfo Esmarady Rocha dos Santos
Neiva Beatriz Ferreira Silva Vicentin
Carlos Alberto Froés Lima

DOI 10.22533/at.ed.7342122026

CAPÍTULO 7..... 83

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DO HOSPITAL DE CLÍNICAS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Álvaro Ribeiro Gomes de Oliveira
Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior
Nivaldo Leite da Silva Júnior

DOI 10.22533/at.ed.7342122027

CAPÍTULO 8..... 97

**ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS: OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE
PROGRAMÁVEL**

Cássio Alves de Oliveira
Josemar Alves dos Santos Junior
Marcos José de Moraes Filho
Vinícius Marcos Pinheiro
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira
Luciano Coutinho Gomes

DOI 10.22533/at.ed.7342122028

CAPÍTULO 9..... 112

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA PARA PREVISÃO DE POTÊNCIA
MÁXIMA EM SUBESTAÇÕES UTILIZANDO REDES NEURAIS**

Thommas Kevin Sales Flores
Pedro Henrique Meira de Andrade
Isaac Emmanuel Azevedo de Medeiros
Juan Moises Mauricio Villanueva

DOI 10.22533/at.ed.7342122029

CAPÍTULO 10..... 126

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA
DISCRETA FRACIONÁRIA DE FOURIER E REDE NEURAL ARTIFICIAL**

Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti
Antônio Carlos Duarte Ricciotti
Adailton Braga Júnior
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira
Júlio César Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.73421220210

CAPÍTULO 11	138
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA COBERTURA DE APLICAÇÃO DE DEFENSIVO AGRÍCOLA USANDO MARCADORES ULTRAVIOLETA	
Edson d'Avila Antônio Carlos Loureiro Lino Inácio Maria Dal Fabbro Ana Cristina da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.73421220211	
CAPÍTULO 12	149
MODELAGEM E CONTROLE DE UM HELICÓPTERO DE BANCADA COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE	
Matheus Sachet Rômulo Lira Milhomem	
DOI 10.22533/at.ed.73421220212	
CAPÍTULO 13	169
ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ESTUFAS HIDROPÔNICAS INTEGRADAS À IOT PARA FINS RESIDENCIAIS	
Rogério Luis Spagnolo da Silva Renan Pinho Lucas Ramalho Paiva Jorge Augusto Igor Falla Henrique Alvarez	
DOI 10.22533/at.ed.73421220213	
CAPÍTULO 14	183
SEGMENTAÇÃO DE EXUDATOS DUROS USANDO LIMARIZAÇÃO ADAPTATIVA E CRESCIMENTO DE REGIÕES	
Rafael de Freitas Brito Milena Bueno Pereira Carneiro Cristiane de Fátima dos Santos Cardoso	
DOI 10.22533/at.ed.73421220214	
CAPÍTULO 15	192
MICROGRID SYSTEM DESIGN BASED ON MODEL BASED SYSTEMS ENGINEERING: THE CASE STUDY IN THE AMAZON REGION	
Miguel Angel Orellana Postigo José Reinaldo Silva	
DOI 10.22533/at.ed.73421220215	
CAPÍTULO 16	208
ESTUDO COMPLEMENTAR DO USO DE UMA FONTE RESSONANTE PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM NÍVEIS DE MÉDIA TENSÃO	
André Pinto Leão Maria Emília Lima Tostes João Paulo Abreu Vieira	

Ubiratan Holanda Bezerra
Marcelo Costa Santos
Ádrea Lima de Sousa
Wesley Rodrigues Heringer
Murillo Augusto Melo Cordeiro
Juan Carlos Huaquisaca Paye
Lucas de Paula Assunção Pinheiro

DOI 10.22533/at.ed.73421220216

CAPÍTULO 17.....224

**FERRAMENTAS DE PROTOTIPAÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE POTÊNCIA:
MATLAB VERSUS PYTHON**

Luciano de Oliveira Daniel
Sergio Luis Varricchio

DOI 10.22533/at.ed.73421220217

CAPÍTULO 18.....240

**SENSIBILIDADES DE POLOS E ZEROS EM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO REPRESENTADAS PELO MODELO DE BERGERON**

Sergio Luis Varricchio
Cristiano de Oliveira Costa

DOI 10.22533/at.ed.73421220218

CAPÍTULO 19.....256

**UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS COM
MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL**

Eloisa Bento Sarmento
Mariana Gomes Costa
Gileno Bezerra Guerra Junior
Helder Alves Pereira

DOI 10.22533/at.ed.73421220219

CAPÍTULO 20.....264

**PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS DE MICROFITA QUASE-
FRACTAL UTILIZANDO A CURVA DE MINKOWSKI NÍVEL 2 COM APLICAÇÕES EM
REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira
Pedro Carlos de Assis Júnior
Relber Antônio Galdino de Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.73421220220

CAPÍTULO 21.....277

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DAS IMPRECIÇÕES NUMÉRICAS
RESULTANTES DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS COM ARITMÉTICA INTEIRA**

Daniel Carrijo Polonio Araujo
Gabriel de Souza Pereira Gomes
Christos Aristóteles Harissis
Rogério Andrade Flauzino

DOI 10.22533/at.ed.73421220221

CAPÍTULO 22.....	298
TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA	
Marcelo Nogueira Tirolli	
Alexandre Borges Marcelo	
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.73421220222	
CAPÍTULO 23.....	312
A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS	
Gabriel de Souza Pereira Gomes	
Daniel Carrijo Polonio Araujo	
Mateus Batista de Moraes	
Rafael Prux Fehlberg	
Murilo Marques Pinto	
Arthur Franklim Marques de Campos	
Marcos Eduardo Guerra Alves	
Rogério Andrade Flauzino	
DOI 10.22533/at.ed.73421220223	
CAPÍTULO 24.....	325
LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO	
Mayara Helena Moreira Nogueira dos Santos	
Matheus Felipe Ayello	
Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro	
André da Costa Pinho	
Angelo Cesar Colombini	
Márcio Zamboti Fortes	
Yona Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.73421220224	
SOBRE OS ORGANIZADORES	343
ÍNDICE REMISSIVO.....	344

TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 16/11/2020

Marcelo Nogueira Tirolli

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Faculdade de Engenharia
Bauru – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4119378032926519>

Alexandre Borges Marcelo

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Ciência e Tecnologia
Sorocaba – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/3179085332485527>

Flávio Alessandro Serrão Gonçalves

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Ciência e Tecnologia
Sorocaba – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/0572855392214977>

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo de técnicas para detecção da condição de corrente nula no indutor (DCNI), sem a utilização direta de sensores de corrente, para aplicações em conversores Boost operando no modo de condução crítica (MCR). O evento da DCNI delimita o comando para entrada em condução do interruptor controlado do conversor Boost no MCR. As técnicas são fundamentadas no monitoramento e condicionamento da forma de onda da tensão no indutor para detecção de situações relacionadas com o advento da corrente sobre o indutor apresentar valor nulo. Técnicas analógica e digital são estudadas e

avaliadas com relação a detecção dos eventos, seguido do projeto dos elementos. Além da detecção da condição de corrente nula, também são descritas formas de condicionamento dos sinais para se enquadrarem dentro de faixas de valores específicos, considerando os estágios subsequentes no sistema de DCNI.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor Boost, modo de condução crítica, corrente nula, condicionamento de sinal.

ZERO CURRENT DETECTION TECHNIQUES FOR APPLICATIONS IN BOOST CONVERTERS OPERATING IN CRITICAL CONDUCTION MODE

ABSTRACT: This work presents the study of techniques for zero current condition detection in inductor, without current sensors for applications concerning boost converters operating in Boundary Conduction Mode (BCM). The event detection allows to turn on the boost converter controlled switch to operate in BCM. Techniques are based on the monitoring and conditioning the voltage waveform in the inductor to get situations related to the advent of the zero current over the inductor. Analog and digital methods are considered and evaluated in relation to the detection of events, followed by the design of the elements. Besides zero current detection condition, signal conditioning is described to fit within value ranges, considering the subsequent stages in the detection system.

KEYWORDS: Boost converter; boundary conduction mode; zero current; signal conditioning.

1 | INTRODUÇÃO

O conversor CC-CC Boost tem por objetivo elevar o nível de tensão de sua entrada (V_{in}) para um valor maior na saída (V_{out}), sendo amplamente empregado em sistemas de iluminação (Wang et al., 2017), integração de sistemas de energias renováveis (Hsieh et al., 2011; Tseng and Huang, 2014), entre outros. O circuito esquemático do conversor Boost é composto basicamente por dois elementos armazenadores de energia (Indutor – L e Capacitor - C) e dois interruptores semicondutores (Transistor – S e diodo), conforme representado na Figura 1.

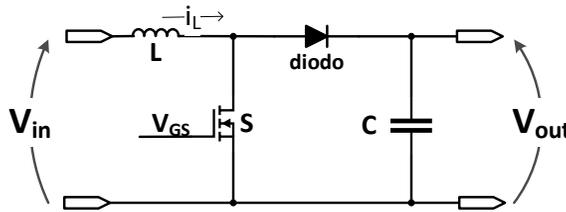


Figura 1: Conversor Boost.

Considerando o formato da onda da corrente no indutor ($i_L(t)$), o conversor Boost pode operar em três diferentes modos de condução, nomeadamente: Modo de Condução Contínua (MCC), Modo de Condução Crítica (MCR) e Modo de Condução Descontínua (MCD), conforme mostra a Figura 2.

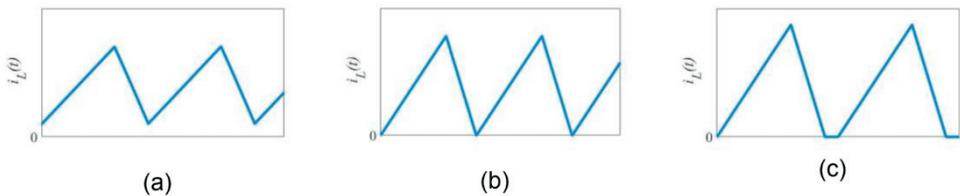


Figura 2: Comportamento da corrente no indutor: (a) MCC; (b) MCR; (c) MCD.

No MCC a corrente $i_L(t)$ sempre apresenta valores superiores a zero, tendo como vantagens em relação aos outros modos (MCD e MCR), operação em frequência constante e possibilidade de aplicação em sistemas de maior potência. Como desvantagens, S e o diodo sempre comutam para os estados de condução e bloqueio de forma dissipativa, além de perdas referentes à recuperação reversa do diodo (Huber et al., 2008; Xu and Huang, 2008).

No MCD, em virtude da característica pulsante da corrente $i_L(t)$, o interruptor S entra

em condução com corrente nula e o diodo bloqueia com derivada suave de decaimento da corrente, atenuando as perdas de comutação relacionadas com a entrada em condução e as perdas relacionadas com a recuperação reversa do diodo. Em contrapartida, a corrente de pico no indutor apresenta valores superiores a duas vezes seu valor médio, sendo necessário o uso de filtros para atenuar a característica pulsante da corrente, limitando seu uso em sistemas na faixa de menor potência (Grote et al., 2011).

No MCR, o conversor Boost opera na região de fronteira entre a continuidade e a descontinuidade da forma de onda de corrente no indutor ($i_L(t)$). O interruptor S deve ser comandado para condução no momento exato em que ocorre a extinção total da corrente no indutor, requerendo para operação uma técnica de detecção da condição de corrente nula no indutor (DCNI). Em virtude deste aspecto, considerando que a DCNI funcione corretamente, ao ocorrer mudanças nas condições da tensão de alimentação V_{in} ou na carga, a frequência de operação do conversor se altera, existindo uma faixa de variação correspondente entre as potências mínima e máxima de operação delimitadas para o conversor. A operação no MCR continua apresentando a desvantagem da característica pulsante da corrente, porém, resulta em um menor esforço de pico de corrente em comparação ao MCD, devido ausência da descontinuidade em $i_L(t)$. (Grote et al,2011;Huber et al,2008;Tsai et al,2008; Xu and Huang, 2008).

Desta forma, a qualidade da DCNI afeta a operação do conversor, por exemplo, se a DCNI inferir o evento considerando a sua antecipação, o conversor seria levado a operar no modo MCC, havendo prejuízo nas vantagens relacionadas com as perdas de comutações. Por outro lado, se a DCNI inferir o evento considerando um atraso, o conversor seria levado a operar no modo MCD, tornando os esforços de pico maiores em virtude da descontinuidade.

2 | METODOLOGIA

Para o conversor operar em MCR, o sistema de controle de chaveamento segue basicamente a estrutura apresentada na Figura 3, composta pela atuação de um flip-flop. Na entrada Set (S), para ativar o interruptor emprega-se a técnica de detecção de corrente nula (DCNI). Enquanto a entrada Reset (R) é utilizada para desativar o interruptor, em que pode estar conectado um sistema de controle baseado em modo tensão, que por meio de V_{in} e V_{out} determina-se o período de chaveamento (T_{sw}) e a razão cíclica (D). O reset também pode ser provido por um sistema baseado no controle de corrente por valores de pico ou médios, quando sensores de corrente são disponíveis (Grote et al., 2011; Tang et al., 2010; Tsai et al., 2008).

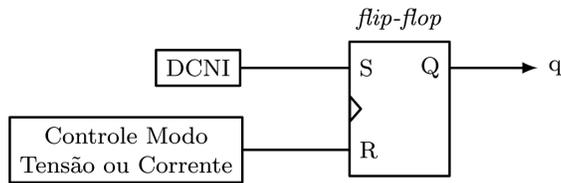


Figura 3: Diagrama para o controle do chaveamento.

Uma maneira usual de monitorar a corrente no indutor é através de sensores do tipo shunt, que fazem uso de um resistor associado em série com o dispositivo para aferir a corrente, uma vez que a tensão nos terminais do resistor é proporcional a corrente que circula pelo dispositivo (Grote et al., 2011; Rodriguez et al., 2012). Como o resistor shunt está posicionado no caminho direto da transferência de energia para a carga, este acaba causando perdas, comprometendo o ganho e o rendimento do conversor (Sanchez et al., 2014). Outra forma de medir a corrente no indutor é através de sensores de efeito Hall. Todavia, apresentam desvantagens relacionadas com custo elevado e pouca sensibilidade para pequenas amplitudes de correntes (Biglarbegian et al., 2018; Wang et al., 2017).

Além da observação direta da corrente, outras técnicas indiretas podem ser aplicadas para detectar o momento que a corrente se torna nula no indutor. Observando o comportamento da forma de onda da tensão no indutor, alguns eventos podem ser utilizados para detectar o momento que a corrente no indutor se anula (DCNI). Para a detecção do evento, podem ser aplicadas técnicas analógicas e digitais a partir de conversores analógicos / digitais (ADC). Os sistemas de controles na forma digital apresentam algumas vantagens, como controle flexível, maior imunidade a ruídos, menor depreciação e quantidade de componentes, entre outros (Chang and Lai, 2009; Kim et al., 2015). Como desvantagem, o ADC necessita apresentar uma elevada taxa de amostragem, podendo chegar a dezenas de vezes a frequência de chaveamento do conversor, o que pode resultar em um custo mais elevado em comparação com as técnicas analógicas (Chen and Liao, 2015).

3 | TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA

Nesta seção são descritas algumas técnicas de DCNI baseadas no monitoramento de eventos que acontecem na forma de onda da tensão do indutor, utilizando abordagens de implementações analógica e digital.

Quando o conversor Boost opera em MCR, durante um período de chaveamento T_{SW} , pode-se estabelecer a operação por meio de dois circuitos equivalentes baseados no estado do interruptor S . No primeiro (Etapa 1), o interruptor S encontra-se em estado de condução e o diodo em condição de bloqueio. No segundo (Etapa 2), S está bloqueado

e o diodo conduzindo estabelecendo o fluxo de corrente da fonte para a carga, conforme Figura 4.

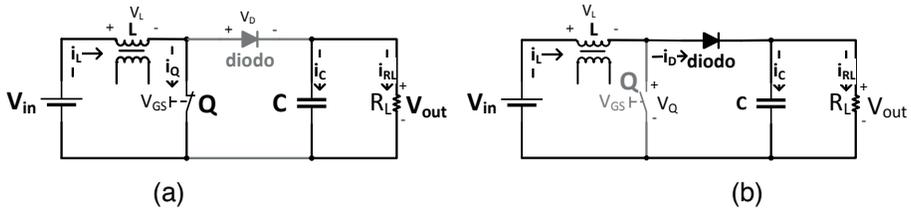


Figura 4: Circuitos equivalentes (a) Etapa 1; (b) Etapa 2.

Aplicando a Lei de Kirchhoff da Tensão (LKT) nos dois circuitos da Figura 4, desconsiderando as perdas das resistências séries dos componentes e da queda de tensão em condução dos semicondutores, a tensão no indutor pode ser definida conforme as equações (1) e (2).

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{in} \quad (1)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - V_{out} \quad (2)$$

Na etapa 1, através da corrente que percorre a malha de entrada do conversor, o indutor armazena energia, o diodo está bloqueado e a saída é alimentada pelo capacitor. Na etapa 2, quando o fluxo de corrente é interrompido através de S , e considerando que a energia armazenada no indutor adicionada com a tensão de entrada é superior a tensão de saída, o diodo entra em condução, permitindo a transferência de energia da fonte para a carga conectada no estágio de saída do conversor e para carregar o capacitor. Com isso, há uma inversão de polaridade na tensão do indutor, e, devido ao processo de transferência da energia armazenada na etapa anterior para a carga, a corrente decresce de forma linear pela relação $(V_{in} - V_{out}) / L$.

Quando o indutor descarregar totalmente a energia, o diodo entra em bloqueio pelo fato da corrente se tornar nula. Neste momento, ocorre um evento, em que a forma de onda da tensão sobre o indutor apresenta uma elevada derivada de crescimento. Caso o interruptor não seja acionado, o valor da tensão no indutor se tornará nulo, levando o conversor a operar em MCD. Se o interruptor for acionado no momento que ocorre o evento, a tensão no indutor retorna ao valor representado por (1), levando o conversor a operar em MCR. Caso o interruptor entre em condução antes da condição nula de corrente no indutor existir, o conversor seria levado a operar em MCC, havendo perda das vantagens relacionadas com as perdas nas comutações. A Figura 5 apresenta o comportamento de $v_L(t)$ e $i_L(t)$ em função do tempo, para os modos de operação descontínuo e crítico, com a

indicação do evento de corrente nula.

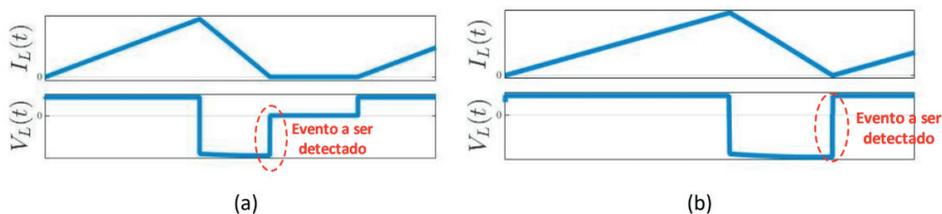


Figura 5: Comportamento dos sinais da corrente e da tensão no indutor (a) MCD; (b) MCR.

Independente da estratégia utilizada para detectar a derivada de crescimento, seja analógica ou digital, é necessário condicionar o sinal $v_L(t)$ para valores que atendam os estágios subsequentes do sistema de DCNI. Uma forma de atenuar $v_L(t)$ e ainda prover isolamento consiste na utilização de um enrolamento secundário no indutor do conversor Boost, não interferindo no desempenho do sistema. O sinal proveniente da bobina secundária do indutor deve atender a níveis de tensão suportados pelos elementos contidos nos sistemas de DCNI e dos estágios de controle do conversor. Considerando o comportamento de $v_L(t)$, a relação de transformação (a_L) pode ser determinada conforme (3).

$$a_L = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{Lsec}} = \frac{N_L}{N_{Lsec}} \quad (3)$$

Na expressão (3), v_{Lsec} é a tensão induzida na bobina secundária de L e que deve apresentar valores próximos aos suportados pelos estágios subsequentes do sistema de DCNI. N_L e N_{Lsec} são as quantidades de espiras do indutor do conversor e do enrolamento secundário, respectivamente.

O conversor Boost operando em MCR em sua configuração ideal apresenta o ganho de tensão conforme (4). Considerando a tensão de saída constante devido ação de sistema de regulação, com a variação da tensão de entrada do conversor, a razão cíclica D é alterada pelo sistema de regulação para manter o ganho. Com isso, a relação de transformação pode ser determinada em função de D , conforme (5).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

$$a_L = \frac{V_{out}D}{V_{Lsec}} = \frac{N_L}{N_{Lsec}} \quad (5)$$

A definição da quantidade de espiras do enrolamento secundário (N_{Lsec}) deve levar em consideração a variação da tensão de entrada, sendo definida considerando o menor valor da razão cíclica, atendendo a expressão (6).

$$N_{Lsec} \geq \frac{V_{Lsec} N_L}{V_{out} D_{min}} \quad (6)$$

A seguir são descritas duas técnicas de DCNI utilizando estratégias analógica e digital. Inicialmente os estudos são apresentados por meio de simulações no software MatLab/Simulink, a fim de verificar a eficácia das técnicas, e na sequência sua implementação prática. As características do conversor CC-CC Boost adotadas são apresentadas na tabela 1.

Tensão de Entrada (V_{in})	127 V	Frequência de Chaveamento (f_{sw})	30 - 70 kHz
Tensão de Saída (V_{out})	400 V	Ondulação de Tensão de saída (ΔV_{out})	1 %
Potência	180 - 430 W	Capacitor (C)	10 μ F
Carga (R_L)	370 a 900 Ω	Indutor (L)	440 μ H

TABELA I: Características do conversor Boost.

3.1 Estratégia Analógica

Uma forma de detectar a derivada de crescimento na forma de onda de $v_L(t)$ é através do uso de filtros do tipo passa alta (FPA) com frequência de corte (f_c) estabelecida acima da frequência de chaveamento máxima do conversor ($f_{sw,max}$). Como exemplo, para a configuração não inversora de um filtro do tipo *Butterworth*, o ganho pode ser definido por (7), em que f é a frequência do sinal de entrada, e n é a ordem do filtro.

$$\frac{V_{out_FPA}}{V_{in_FPA}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^{2n}}} \quad (7)$$

Considerando o sinal de entrada do filtro (v_{Lsec}) como sendo uma onda quadrada com frequência f_{sw} , o filtro passa alta atua como um diferenciador, em que os pulsos presentes na forma de onda de sua saída ($V_{R_FPA}(t)$) representam a variação da entrada, conforme (8).

$$V_{R_FPA}(t) \approx R_{FPA} C_{FPA} \frac{dv_L(t)}{dt} \quad (8)$$

onde R_{FPA} e C_{FPA} são o resistor e o capacitor do diagrama esquemático de um filtro passa alta.

A taxa de decaimento dos pulsos depende da constante de tempo ($R_{FPA} C_{FPA}$) e da frequência do sinal de entrada (f_{sw}). Quando $\tau = T_{sw}$ a forma de onda da saída se torna praticamente igual à da entrada, filtrando as frequências baixas. Já para $\tau \ll T_{sw}$, a forma de onda da saída apresenta pulsos com amplitudes referentes a variação da entrada, e, na sequência passam a decair. A Figura 6 apresenta a resposta do filtro passa alta para a

entrada v_{Lsec} com f_{sw} de 50 kHz em função da variação da constante de tempo T .

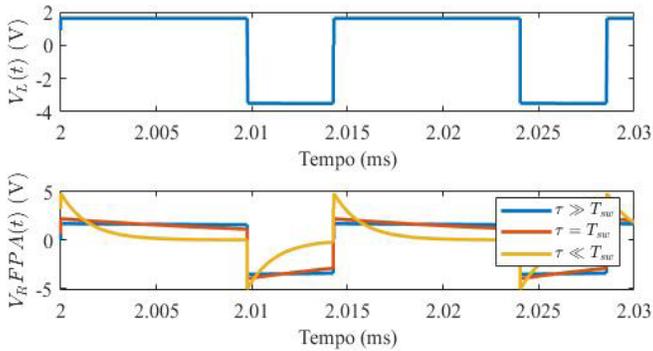


Figura 6: Resposta do filtro passa alta em função da variação de τ .

Quanto menor for a constante de tempo em relação a T_{sw} , menor será a largura do pulso e mais acentuada se torna a taxa de decaimento. Assim, para obter um padrão com relação a amplitude do pulso, que está relacionado diretamente com a derivada de v_{Lsec} , é interessante ajustar a constante de tempo de forma que a taxa de decaimento alcance o valor próximo a zero antes da ocorrência do próximo pulso.

A Figura 7 apresenta o diagrama de blocos com as etapas necessárias para detectar o evento de corrente nula no indutor a partir do sinal da tensão do indutor utilizando estratégia analógica.

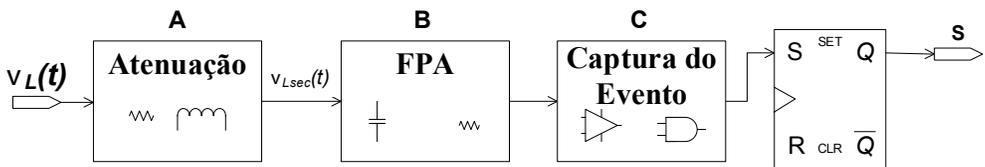


Figura 7: Diagrama de blocos para DCNI utilizando estratégia analógica.

O bloco A corresponde a atenuação do sinal de tensão no indutor proveniente de um enrolamento secundário do indutor do conversor, conforme mencionado na seção 3.

O bloco B é constituído por um filtro passa alta, em que se define a ordem (n) e a frequência de corte (f_c). Alterando n , a resposta do filtro para a entrada de v_{Lsec} , apresenta comportamento conforme mostra a Figura 8. Com o objetivo de fazer com que o filtro opere como um diferenciador, a utilização de filtros de primeira ordem apresenta menores

oscilações. No emprego de filtros com ordens superiores, o primeiro sobre-sinal (*overshoot*) proveniente da resposta do filtro quando S é comandado para bloqueio pode representar uma falsa detecção.

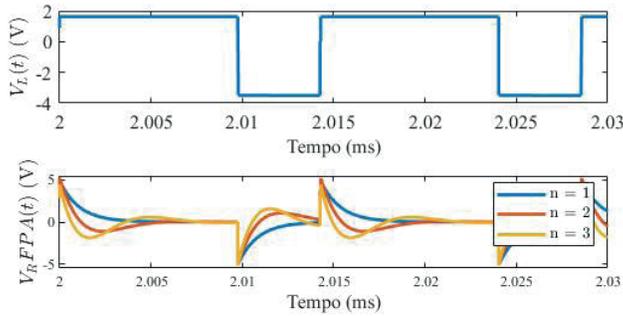


Figura 8: Resposta do FPA em função da ordem n .

A frequência de corte do filtro de primeira ordem é definida através de (9), baseada na frequência (f_{sw}) estabelecida para o conversor operar. Considerando que o conversor Boost operando em MCR trabalha com frequência variável (em função de alterações na carga ou na tensão de entrada), a frequência de corte do filtro deve ser estabelecida como sendo superior a frequência máxima que o conversor possa vir a operar. Quanto maior a frequência de corte, mais estreitos ficam os pulsos, podendo comprometer a detecção do sinal.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{FPA} C_{FPA}} \quad (9)$$

O bloco C corresponde a captura do evento, em que pode ser utilizado um comparador de tensão configurado para excitar sua saída quando receber o sinal proveniente do filtro passa alta.

Dependendo do tempo de duração do pulso proveniente do filtro, pode ser necessário a utilização de circuitos detectores de borda para garantir o fornecimento de um pulso com tempo suficiente para prover a excitação do flip-flop. O tempo de duração do pulso (T_{dur}) pode ser estimado a partir de (10), onde $V_{R_{FPA_{max}}}$ representa a tensão máxima de saída do filtro.

$$T_{dur} = \tau \cdot \ln\left(\frac{v_{Lsec}}{V_{R_{FPA_{max}}}}\right) \quad (10)$$

A Figura 9 apresenta o resultado de uma simulação computacional empregando a estratégia analógica para DCNI a partir de $v_L(t)$. Foram considerados os parâmetros do

conversor mencionados na Tabela I ($f_{sw} = 50 \text{ kHz}$ e carga de 640Ω).

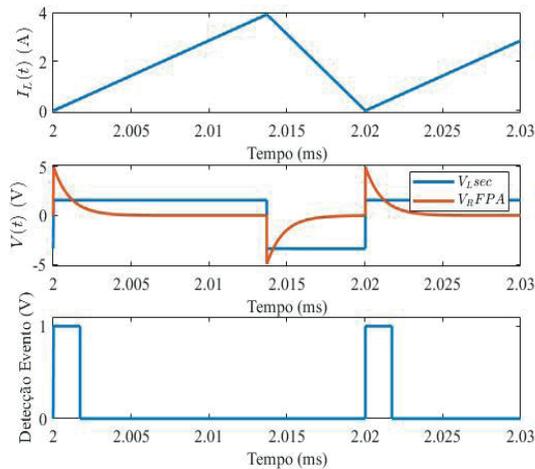


Figura 9: Resultado da simulação - estratégia analógica.

O evento detectado na Figura 9 apresentou um pulso com tempo de duração (T_{dur}) de aproximadamente $0,5 \mu\text{s}$.

A Figura 10 mostra os sinais de v_{Lsec} , resposta do filtro, evento detectado e i_L , provenientes de um ensaio prático considerando o mesmo cenário aplicado na simulação.

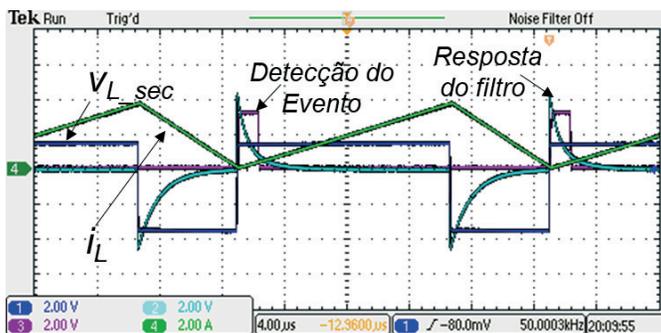


Figura 10: Resultado da implantação prática - estratégia analógica.

3.2 Estratégia Digital

Outra possibilidade de detectar a derivada de subida da tensão no indutor é através da utilização de um conversor analógico-digital (ADC), que leva a necessidade de especificar alguns parâmetros, tais como, quantidade de bits, taxa de amostragem e faixa

de aquisição.

A etapa de condicionamento do sinal para trabalhar com ADC, além da necessidade de atenuação, necessita efetuar a eliminação da parcela negativa de v_{Lsec} que aparece quando o interruptor está bloqueado, e, também requer um filtro de anti-aliasing.

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos para a implantação da técnica de DCNI através de $v_L(t)$ utilizando estratégia digital.

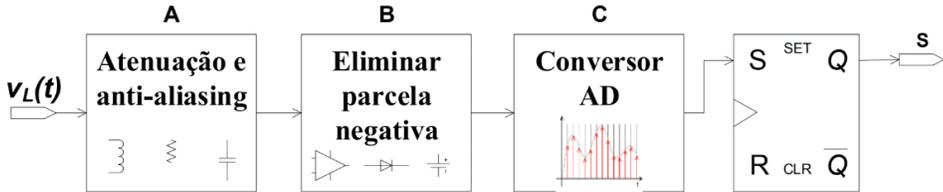


Figura 11: Diagrama de blocos para DCNI utilizando estratégia digital a partir de v_L .

O bloco A referente a atenuação pode ser feita da mesma forma descrita anteriormente na seção 3. Adiciona-se ainda um filtro anti-aliasing para que o sinal não apresente um reflexo de componentes de alta ordem.

O bloco B tem a função de eliminar a parcela negativa do sinal v_{Lsec} , podendo ser concretizado por meio de um diodo ou um circuito que adicione um nível CC (offset).

Para o conversor operar em MCR é extremamente importante detectar de forma efetiva a derivada de subida e com um mínimo de atraso. Isto está diretamente relacionado com a taxa de amostragem do ADC no bloco C. Considerando que a cada período de chaveamento ocorre somente um evento no sinal v_{Lsec} que representa o estado de corrente nula, uma elevada taxa de amostragem se faz necessária. A Figura 12 mostra que quando o conversor está operando com uma frequência de chaveamento de 50 kHz, a forma de onda amostrada com frequências (f_{SR}) inferiores a 200 kHz fica totalmente desconfigurada, impossibilitando a detecção do evento. Para f_{SR} superiores a 200 kHz, a forma de onda amostrada mantém as características do evento a ser detectado, porém com um respectivo atraso que pode levar o conversor a operar em MCD.

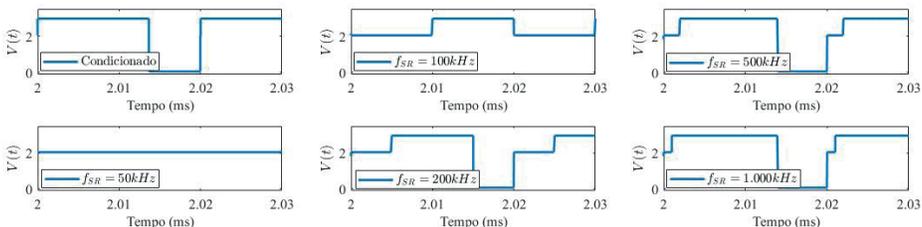


Figura 12: Comportamento do sinal amostrado em função da variação de f_{SR} .

O formato de v_{Lsec} apresenta dois estados, sendo um alto (Etapa 1) e outro baixo (Etapa 2). Com isso não é necessário utilizar conversores ADC de alta resolução, além de trabalhar com interpretação de pontos fixos, visto que não há necessidade de precisão dos valores, e sim a detecção de um evento.

A Figura 13 apresenta o resultado de uma simulação empregando a estratégia digital para DCNI a partir de $v_L(t)$, em que foram considerados os parâmetros descritos da Tabela I. O ADC tem resolução de 12 bits e frequência de amostragem de 1000 kHz. O sinal na entrada do ADC, após atenuação e eliminação da parcela negativa apresenta uma variação entre 0 V (Etapa 2) e 3 V (Etapa 1). Considerando o valor de 1 V na entrada do ADC como limite para DCNI, e, fazendo uma escala de conversão entre a variação da tensão e quantidade de estados do ADC, qualquer estado superior a 1365 em representação inteira, representa que $i_L(t)$ apresenta valor nulo.

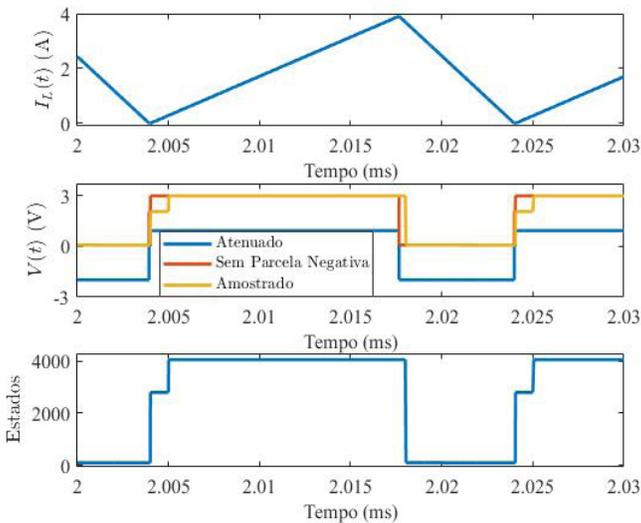


Figura 13: Resultado da simulação - estratégia digital.

A Figura 14 apresenta o resultado proveniente do ensaio prático considerando o mesmo cenário aplicado na simulação, utilizando o conversor ADS2807 e o sistema de controle baseado na FPGA ZYNQ-7000. É possível verificar os sinais da entrada do ADC (v_L), o sinal digitalizado (forma de estados) e o evento detectado quando o estado do ADC é superior a 1365.

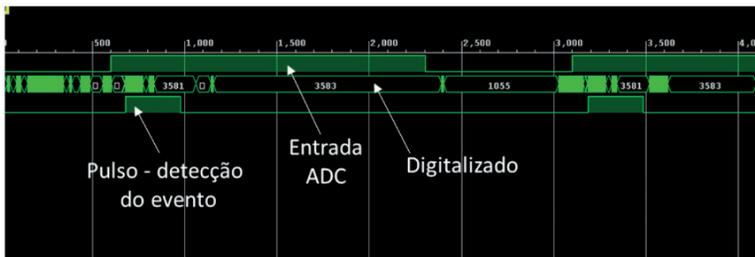


Figura 14: Resultado da implantação prática - estratégia digital.

4 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de métodos de detecção da condição de corrente nula em indutores, sem a necessidade de sensores de corrente convencionais, aplicados em um conversor CC-CC Boost e fundamentados em eventos que ocorrem na forma de onda da tensão no indutor. Estratégias analógica e digital foram abordadas, considerando o comportamento dos sinais característicos ao longo das etapas de condicionamento e detecção do evento.

As estratégias foram fundamentadas na forma de onda de tensão de um enrolamento secundário do indutor do conversor Boost. Para a estratégia analógica foi demonstrada uma metodologia para o projeto da relação de espiras tomando a possibilidade de variação da razão cíclica do conversor devido a distúrbios da tensão de entrada e carga. Com relação a estratégia digital, em função da necessidade de detecção de um evento que ocorre uma única vez em cada período de chaveamento do conversor, a frequência de amostragem do ADC deve ser elevada.

Nas avaliações práticas das duas metodologias, em ambos os casos o conversor se manteve operando no modo de condução crítica. Porém, a metodologia analógica apresentou um tempo de atraso para a efetivação da detecção do evento (100 ns) menor em relação ao tempo obtido para a metodologia digital com a frequência de amostragem utilizada (130 ns).

REFERÊNCIAS

Biglarbegan, M., Kim, N., and Parkhideh, B. (2018). **Boundary conduction mode control of a boost converter with active switch current-mirroring sensing**. IEEE Transactions on Power Electronics, 33(1), 32-36.

Chang, Y.T. and Lai, Y.S. (2009). **Online parameter tuning technique for predictive current-mode control operating in boundary conduction mode**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(8), 3214-3221.

- Chen, H.C. and Liao, J.Y. (2015). **Modified interleaved current sensorless control for three-level boost pfc converter with considering voltage imbalance and zerocrossing current distortion.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(11), 6896-6904.
- Grote, T., Figge, H., Fröhleke, N., Böcker, J., and Schafmeister, F. (2011). **Digital control strategy for multiphase interleaved boundary mode and dcm boost pfc converters.** In Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 3186-3192.
- Hsieh, Y.P., Chen, J.F., Liang, T.J., and Yang, L.S. (2011). **A novel high step-up DC {DC converter for a microgrid system.** IEEE Transactions on Power Electronics, 26(4), 1127-1136.
- Huber, L., Irving, B.T., and Jovanovic, M.M. (2008). **Open-loop control methods for interleaved dcm/ccm boundary boost pfc converters.** IEEE Transactions on Power Electronics, 23(4), 1649-1657.
- Kim, J.W., Youn, H.S., and Moon, G.W. (2015). **A digitally controlled critical mode boost power factor corrector with optimized additional on time and reduced circulating losses.** IEEE Transactions on Power Electronics, 30(6), 3447-3456.
- Rodriguez, M., Lopez, V.M., Azcondo, F.J., Sebastian, J., and Maksimovic, D. (2012). **Average inductor current sensor for digitally controlled switched-mode power supplies.** IEEE Transactions on Power Electronics, 27(8), 3795-3806.
- Sanchez, A., de Castro, A., López, V.M., Azcondo, F.J., and Garrido, J. (2014). **Single ADC digital pfc controller using precalculated duty cycles.** IEEE Transactions on Power Electronics, 29(2), 996-1005.
- Tang, S.H., Chen, D., Huang, C.S., Liu, C.Y., and Liu, K.H. (2010). **A new on-time adjustment scheme for the reduction of input current distortion of critical-mode power factor correction boost converters.** In Proc. Int. Power Electronics Conf. - ECCE ASIA -, 1717-1724.
- Tsai, J.R., Wu, T.F., Wu, C.Y., Chen, Y.M., and Lee, M.C. (2008). **Interleaving phase shifters for critical-mode boost pfc.** IEEE Transactions on Power Electronics, 23(3), 1348-1357.
- Tseng, K.C. and Huang, C.C. (2014). **High step-up high efficiency interleaved converter with voltage multiplier module for renewable energy system.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(3), 1311-1319.
- Wang, J., Maruta, H., Matsunaga, M., and Kurokawa, F. (2017). **A novel predictive digital controlled sensorless pfc converter under the boundary conduction mode.** Journal of Power Electronics, 17, 1-10.
- Xu, X. and Huang, A.Q. (2008). **A novel closed loop interleaving strategy of multiphase critical mode boost pfc converters.** In Proc. Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition, 1033-1038.

ÍNDICE REMISSIVO

A

AMI 1, 2, 3, 4, 5, 7, 12, 124

Aneel 6, 52, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 84, 96, 127, 136, 209, 221

Aterramento 25, 27, 28, 29, 32, 34, 37, 38, 72, 77, 209

Automação 1, 7, 25, 26, 32, 33, 37, 61, 138, 149, 164, 168, 169, 325, 330, 333, 341

C

Classificação 1, 12, 126, 128, 131, 134, 135, 136, 184, 209

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

Consumo de Energia 4, 83, 84, 138, 161, 172, 181, 259, 260

Curto-Circuito 65, 100, 126, 128, 131, 132, 133, 134, 135, 234

D

Danos Elétricos 71, 72, 73, 76, 80, 82

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

Densidade de potência 13, 15, 16, 17, 19

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

Distribuição de Energia Elétrica 72, 81, 96, 112, 113, 125, 127, 210, 221, 222

DPS 71, 72, 77, 78, 79, 80, 81

E

Ensaio 97, 98, 99, 103, 104, 108, 109, 111, 219, 324

Estudo comparativo 13, 15, 275

I

IEC 61850 54, 55, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 207, 330, 331, 332, 333, 339, 340, 341, 342

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

L

Linhas de transmissão 54, 56, 62, 64, 65, 112, 113, 227, 240, 327

M

Medição 1, 3, 4, 7, 8, 11, 54, 58, 59, 60, 64, 79, 80, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 95, 96, 106, 138,

140, 141, 142, 217, 218, 219, 220, 221, 271, 272, 331, 338

Medidores Inteligentes 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

Motor de indução 13, 14, 19, 97, 98, 100, 101, 102, 104

Motor de indução trifásico 97, 98, 100, 101, 104

N

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

P

Previsão de Demanda 112, 113, 114, 115, 119, 124, 125

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

Proteção Diferencial 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69

Q

Qualidade de energia 1, 11, 76, 96, 126, 127, 128, 217

R

Redes Neurais Artificiais 112, 115, 126, 128, 136

Rendimento 15, 16, 19, 20, 95, 97, 98, 101, 102, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 301

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

S

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

Smart Grid 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12, 192, 193, 195, 207, 341

Subestação 29, 83, 84, 95, 96, 112, 115, 116, 124, 331

T

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

Transformador 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 132, 212, 213, 221, 313, 337

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

V

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16