

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
Prof^ª Dr^ª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^ª Dr^ª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^ª Dr^ª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof^ª Dr^ª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^ª Dr^ª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof^ª Dr^ª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof^ª Dr^ª 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. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª 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
Prof^ª 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. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª Livia 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 LIMIAÇÃO 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

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

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 16/11/2020

Thommas Kevin Sales Flores

Universidade Federal da Paraíba,
Departamento de Engenharia Elétrica
João Pessoa – Paraíba
<http://lattes.cnpq.br/0630479458408181>

Pedro Henrique Meira de Andrade

Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Departamento de Engenharia Elétrica
Natal – Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/6695123583643731>

Isaac Emmanuel Azevedo de Medeiros

Universidade Federal da Paraíba,
Departamento de Engenharia Elétrica
João Pessoa – Paraíba
<http://lattes.cnpq.br/4382886029864606>

Juan Moises Mauricio Villanueva

Universidade Federal da Paraíba,
Departamento de Engenharia Elétrica
João Pessoa – Paraíba
<http://lattes.cnpq.br/1446817462218646>

Resumo: Os estudos de previsão de demanda têm grande importância para empresas do ramo de energia elétrica, pois existe a necessidade de alocação de recursos com antecedência, exigindo um planejamento a curto, médio e longo prazo. Tais recursos incluem a compra de equipamentos, aquisição e construção de linhas de transmissão, manutenções preventivas

e comércio de energia. Diante disso, foi desenvolvida uma ferramenta computacional de apoio aos especialistas da área de planejamento estratégico em sistemas de distribuição elétrica, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) para previsão da potência ativa demandada, além de incluir a temperatura como fator de influência externo. Na metodologia proposta, foi implementado um sistema de previsão a curto prazo para a subestação de uma cidade da Paraíba, utilizando técnicas computacionais de inteligência artificial baseadas em Redes Neurais Artificiais, com auxílio do *software* Matlab. Para isso, foram utilizados dados de potência ativa, fornecidos pela concessionária de energia, e o histórico dos valores de temperatura locais foram obtidos através da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2008. A janela de previsão utilizada foi de 12 valores atrasados para fornecer um horizonte de 4 dias. Finalmente, a acurácia das redes obtidas via treinamento foi medida considerando o MAPE e erro relativo percentual.

PALAVRAS - CHAVE: Previsão de Demanda, Distribuição de Energia Elétrica; Previsão de Séries Temporais; Redes Neurais Artificiais; Inteligência Artificial.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE TO PREDICT MAXIMUM POWER IN SUBSTATIONS USING NEURAL NETWORKS

ABSTRACT: Load forecasting studies are of great importance for companies in the electric energy sector, because there is a need to allocate resources in advance, requiring short, medium

and long-term planning. These resources include the purchase of equipment, acquisition and construction of transmission lines, preventive maintenance and commercialization of energy. Therefore, a computational tool was developed to support specialists in the area of strategic planning in electrical distribution systems, using Artificial Neural Networks to forecasting demand, and including temperature as an external factor. In the proposed methodology, a short-term forecasting system was implemented for a real substation, using computer artificial intelligence techniques based on Artificial Neural Networks, using Matlab software. For this, were used active power data provided by the power utility, and the history of local temperature values were obtained from INMET's website, all for the year 2008. The forecast window used was 12 lagged values to obtain the following 4. Finally, the accuracy of the networks obtained from training were measured considering MAPE and percentage error.

KEYWORDS: Load Forecasting; Electric Power Distribution; Time Series Forecasting; Artificial Neural Networks; Artificial Intelligence.

1 | INTRODUÇÃO

A energia gerada pelo sistema de geração necessita ser distribuída em todo o país e, para isso, existe o Sistema Interligado Nacional (SIN), que inclui a maior parte do território nacional, e é formado por conexões entre as cinco regiões do Brasil.

As empresas de distribuição de energia elétrica devem elaborar relatórios periódicos de previsões de demanda das cargas localizadas em sua área de concessão, nos horizontes definidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (RIBEIRO et al., 2006).

Além desses estudos, as empresas realizam análises internas, com o objetivo de planejar as decisões de operação, controle e manutenção dos sistemas. Em relação aos recursos que necessitam de antecedência de reserva, destacam-se: construção de novas linhas transmissão, compra e venda de energia, compra de novos equipamentos e manutenções preventivas.

A previsão de demanda pode ser feita para os horizontes de longo, médio, curto e curtíssimo prazo (ANWAR et al., 2018). A possibilidade de diversos horizontes de planejamento, portanto, conduz a prática de previsão de demanda para grande complexidade. A previsão a longo prazo possui como horizonte o período de anos ou décadas, e objetiva o planejamento para incrementar a capacidade das linhas de transmissão ou construção de novas plantas de geração.

Por outro lado, a previsão de demanda de médio prazo, que ocorre desde semana a meses, permite às concessionárias e empresas de energia elétrica alocar seus recursos como: manutenções nas redes elétricas, a compra de equipamentos, expansão do seu sistema, estratégias no mercado de energia (GHIASSI et al., 2006) e (ANWAR et al., 2018). A previsão de curto prazo possui algumas horas como horizonte, e pode avaliar a segurança do sistema, analisar confiabilidade, além do planejamento de manutenções. A previsão de

curtíssimo prazo prevê minutos à frente, sendo importante na regulação entre a demanda e oferta por energia elétrica a fim de evitar flutuações, ajustando a geração de energia às constantes mudanças (CARMONA et al., 2002).

Para uma visão a longo prazo, o intervalo de tempo deverá variar de cinco a dez anos, se aproximando do limite superior para redes de transmissão de subestações, e do limite inferior para redes de distribuição. A atualização destes planos deve ser anual, de forma a permitir ao regulador e à sociedade acompanhar mudanças de tendências nos investimentos, bem como, comparar o que foi planejado e o que foi efetivamente implementado, considerando, naturalmente, as motivações e barreiras de caráter econômico, estrutural, legal e ambiental (SANTOS et al., 2008). Os estudos de previsão de demanda têm como objetivo auxiliar no plano anual de expansão.

Neste sentido, anterior ao surgimento da Inteligência Artificial (IA), apenas os métodos estatísticos e probabilísticos, liderados pelos modelos Box e Jenkins eram aplicados em séries temporais para previsão (BOX et al., 2015). Com o desenvolvimento de técnicas computacionais, que levam vantagem diante da não linearidade dos dados e sem depender de modelos matemáticos complexos, métodos de inteligência artificial passaram a ser utilizados em previsão de demanda (ANDRADE et al., 2020), (SONMEZ et al., 2017) e (HAPUARACHCHI et al., 2018).

Pelka et al. (2020) utilizam uma rede LSTM (*Long Short-Term Memory*) para previsão da demanda mensal de energia, considerando um horizonte de um ano a partir dos dados temporais. Dudek et al. (2020) também utilizam LSTM, porém combinada com a suavização exponencial (ETS - *Exponential Smoothing*) com o objetivo de melhorar a performance da previsão ao levar em consideração a sazonalidade da série temporal.

ALI et al. (2019) propõem um método para previsão de demanda com o horizonte de curtíssimo prazo: 1 hora à frente. O método criado mapeia a série temporal em busca de padrões semelhantes criando *clusters*. O interessante deste trabalho é que leva em consideração as condições do tempo para aquela hora em estudo. O menor valor de MAPE encontrado foi 4,3% para 5 *clusters*.

Liao e Pan (2019) implementam uma nova estrutura para previsão a curto prazo. É utilizada o conceito de *Dense Average Connection* para a criação de uma rede neural para estimação de carga que leva em consideração os valores passados da demanda e da temperatura. O menor MAPE calculado foi 0,36%, considerando a nova estrutura proposta.

Lang (2019) utilizam redes neurais convulsionais com uma dimensão para prever a demanda de energia elétrica em 36 horas no futuro. Massaoudi et al. (2019) combinam a rede LSTM com a NARX (*Nonlinear Autoregressive Exogenous*) para formar um modelo híbrido de previsão de consumo de potência em sistemas fotovoltaicos. Nesse trabalho, além da temperatura foram consideradas como entradas exógenas a umidade relativa, velocidade do vento e a radiação solar. Massaoudi et al. (2019) encontrou 0,269% como menor valor do MAPE.

Este trabalho, portanto, consiste em desenvolver uma ferramenta computacional para previsão de demanda, destinada a especialistas da área de planejamento estratégico em sistemas de distribuição, com enfoque em Redes Neurais Artificiais (RNA). Além disso, será investigado a influência da variável temperatura na previsão, além de uma comparação entre os resultados considerando ou não este aspecto.

2 | METODOLOGIA

2.1 Previsão de demanda

O processo de previsão de demanda proposto neste trabalho por meio da RNA ocorre, basicamente, em três etapas: treinamento, validação e teste. A etapa de treinamento consiste em apresentar os dados à rede para que ocorra o aprendizado. Na validação, são realizados testes ao fim de cada iteração de treino. O teste, ou previsão, fornece o resultado desejado pelo usuário.

Como entradas das RNA, foi considerada uma janela de valores de demanda passados, bem como, dados correspondentes de temperatura. Estudos anteriores indicam maior eficiência no resultado das previsões quando outras variáveis altamente correlacionadas com a demanda são consideradas (ALI et al., 2019), (LIAO e Pan, 2019) e (Massaoudi et al., 2019).

Neste contexto, serão apresentadas a seguir as etapas para o uso da RNA para um estudo prático em uma subestação no estado da Paraíba, cujo seu diagrama unifilar encontra-se na Figura 1. Finalmente, será testada a hipótese de que a inclusão da temperatura irá melhorar a performance dos modelos de previsões desenvolvidos.

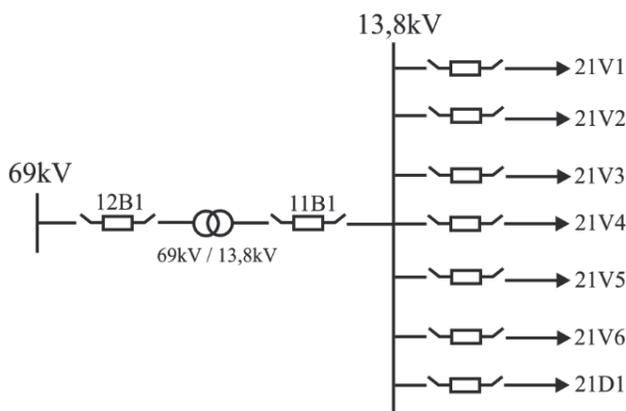


Figura 1- Diagrama unifilar de uma subestação na Paraíba.

2.2 Implementação do conjunto de dados

Os dados de potência ativa foram cedidos pela concessionária de energia local, os quais foram obtidos através de um sistema de aquisição de dados (SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), que é responsável pela aquisição nos equipamentos/barramentos da subestação e envio para um banco de dados.

Além disso, para todo o intervalo de tempo em que foi feita a análise de potência ativa, foram acrescentados os devidos valores diários de temperatura correspondentes, adquiridos via site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a cidade em estudo na Paraíba.

O sistema realiza as medições a cada 15 minutos, totalizando 96 medições por dia. As máximas diárias de cada uma destas variáveis estão ilustradas no gráfico da Figura 2. A Tabela 1 apresenta os 4 primeiros valores do banco de dados utilizado neste trabalho.

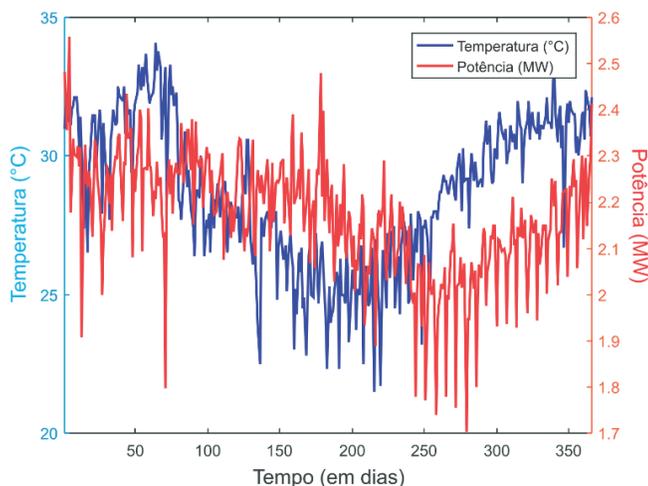


Figura 2 - Máximas diárias de temperatura e potência.

Dia	Mês	Ano	Potência (MW)	Temperatura (°C)
1	1	2008	2,481	31,0
2	1	2008	2,418	31,8
3	1	2008	2,355	31,8
4	1	2008	2,55	32,3

Tabela 1 - Amostra do conjunto de dados utilizado

Do banco de dados, 30% (109 dias) foi separado para os testes expostos na Seção dos Resultados. Do conjunto complementar, 80% foi utilizado para treinamento, 10% para

validação e 10% para teste. Ou seja, foram utilizados 256 dias para a criação do modelo.

Para uma análise prévia dos conjuntos de dados elétricos e climáticos, elaborou-se os gráficos com a média e triplo do desvio padrão, ilustrados nas Figura 3 e Figura 4. Estes gráficos correspondem aos valores máximos de cada dia ao longo do ano em estudo, afim de detectar possíveis medidas anômalas, por exemplo valores nulos e pontos fora da curva ou *outliers*. O tratamento das anomalias do sinal foi desenvolvido por este grupo de pesquisa em (ANDRADE et al., 2020), mas está fora do escopo deste trabalho; contudo destaca-se a sua necessidade.

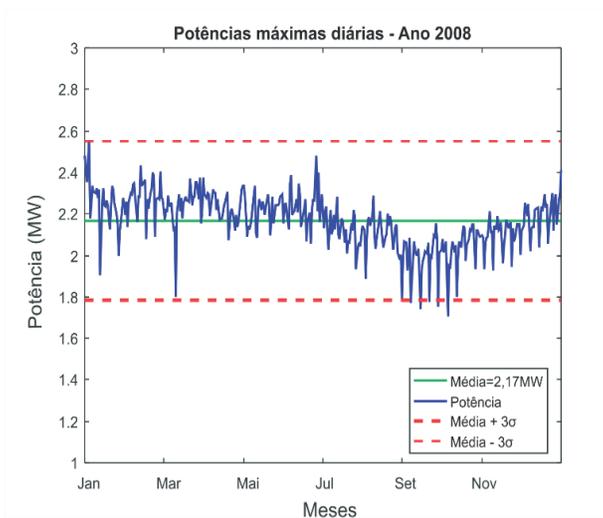


Figura 3 - Limiar das máximas diárias da potência.

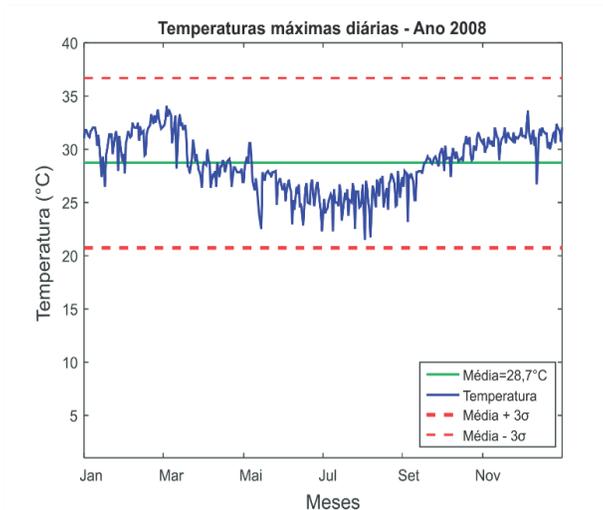


Figura 4 - Limiar das máximas diárias da temperatura.

2.3 Treinamento da RNA

Para o treinamento da RNA, foi proposto um horizonte de previsão fixo, para potência e temperatura máximas diárias, de 4 dias à frente, caracterizando em uma previsão a curto prazo. Ademais, considerou-se como entradas doze amostras passadas de ambas as variáveis (janela de previsão).

Este estudo de caso considerará duas condições como entradas da RNA: potência ativa máxima (a) da Figura 5, e outra considerando as amostras da potência ativa e temperatura máximas (b) da Figura 5. Além disso, em ambos os casos os valores passados das saídas serão retroalimentados.

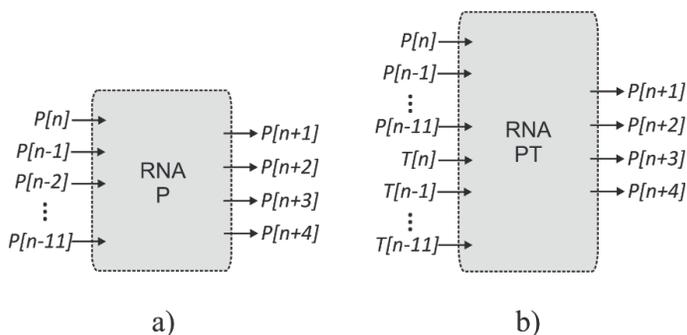


Figura 5 - Entradas e saídas da RNA e janelamento desconsiderando a temperatura.

O ambiente computacional para realização de todas as simulações foi o Matlab e os parâmetros foram definidos da seguinte forma:

- Número de camadas: 2;
- Número de neurônios: para o treinamento da rede, foram variadas e combinadas as quantidades de neurônios de 1 a 40 para cada camada, afim de encontrar a melhor rede neste intervalo;
- Algoritmo de aprendizado: Algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM).

O algoritmo Levenberg-Marquardt (LM) é definido neste software como “*trainlm*”, como aperfeiçoamento do tradicional algoritmo *Backpropagation*. O algoritmo LM faz uso do erro quadrático médio para corrigir os pesos da rede quando sua saída diferir da desejada e é bastante efetivo para redes neurais pequenas (LEVENBERG, 1944) e (MARQUARDT, 1963).

2.4 Teste e validação da RNA

Foram elaborados algoritmos para que, ao final do treinamento de todas as redes,

fossem obtidas as melhores configurações de RNA a partir das seguintes métricas de avaliação: menor erro relativo e erro médio percentual absoluto (MAPE, do inglês *Mean Absolute Percentage Error*), durante a fase de testes. Definidos matematicamente por Equação 1 e Equação 2 respectivamente.

$$E_r = \frac{P_j - T_j}{P_j} \quad (1)$$

$$MAPE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{P_j - T_j}{P_j} \right| \times 100 \quad (2)$$

Em que,

- N : tamanho do conjunto de validação;
- P_j : previsão do modelo, para $j = 1, 2, 3, \dots, N$;
- T_j : teste (banco de dados), para $j = 1, 2, 3, \dots, N$.

A validação está atrelada a simulação da rede para o conjunto de dados que não foram aplicados no treinamento. A cada passo, o valor previsto será realimentado para o grupo de entradas, de forma que os valores a serem previstos sofram influência da previsão anterior. Portanto, quanto menor o valor do MAPE, menor é o erro de estimação.

3 I RESULTADOS

Neste capítulo, serão expostos os resultados do trabalho em detalhes. Desse modo, serão levadas em consideração as topologias de RNA propostas na seção anterior, para a previsão de demanda. Os desempenhos das redes foram avaliados na etapa de teste, considerando o MAPE e erro relativo como métricas de avaliação.

Buscando encontrar a melhor topologia da RNA, foram realizados treinamentos utilizando duas camadas ocultas, em que cada uma poderia comportar no máximo 40 neurônios. Portanto, foram obtidas 1600 configurações de redes para testes e avaliação da que apresentaria a melhor performance.

3.1 Previsão considerando potência e a temperatura como entradas

Com a topologia da Rede Neural apresentada na Figura 5 b), denominada “RNA PT”, tendo como entradas temperatura e potência, para a previsão da demanda, foi inicialmente realizado o procedimento de treinamento. Para isso, os parâmetros utilizados foram os presentes na seção 2.3.

Uma vez realizado o treinamento de todas as redes, estas foram avaliadas utilizando os dados de teste, considerando um período de 106 dias, equivalente a 30% do número total de amostras. Na Figura 6 foi esboçado o comportamento do MAPE para todas as redes

encontradas, em que o eixo y representa o número de neurônios da primeira camada, x a quantidade de neurônios da segunda camada e, finalmente, o valor no eixo z representa o valor absoluto da métrica MAPE, em percentagem.

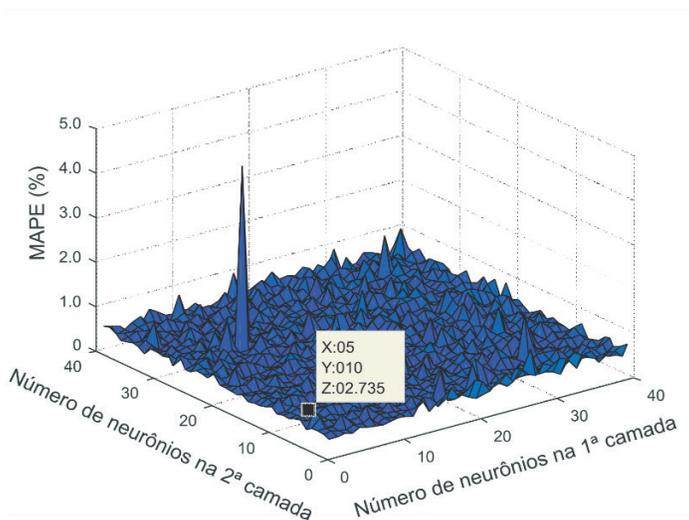


Figura 6 - MAPE considerando potência e temperatura.

Sendo assim, a RNA que apresentou menor valor de MAPE, 2,73%, foi a rede com 10 e 5 neurônios na primeira e segunda camadas, respectivamente. Ademais, a rede com 31 e 5 neurônios na primeira e segunda camadas, respectivamente, foi a que exibiu o menor erro relativo, igual a 8,71%.

Nas Figuras 7 e 8 estão os resultados do teste para a RNA de topologia com o menor MAPE e menor erro relativo, respectivamente, para 106 dias. Nota-se que a topologia de melhor MAPE apresenta resultado superior, divergindo com menor frequência da curva objetivo quando comparado ao gráfico da Figura 8, o qual a topologia da RNA leva em consideração o menor erro relativo.

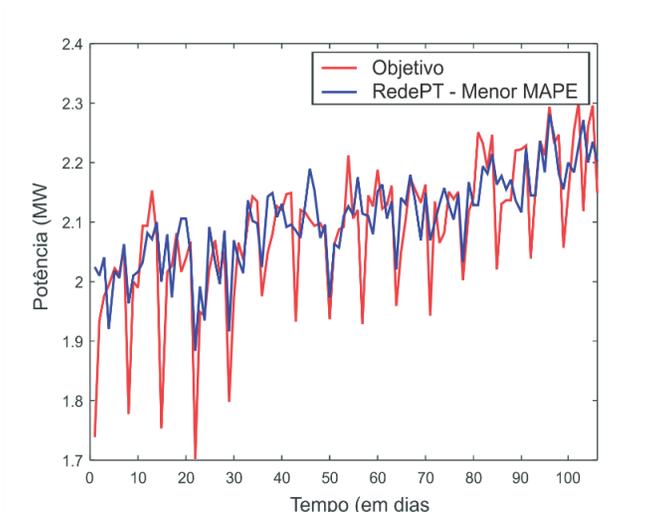


Figura 7 - Previsão da rede menor MAPE.

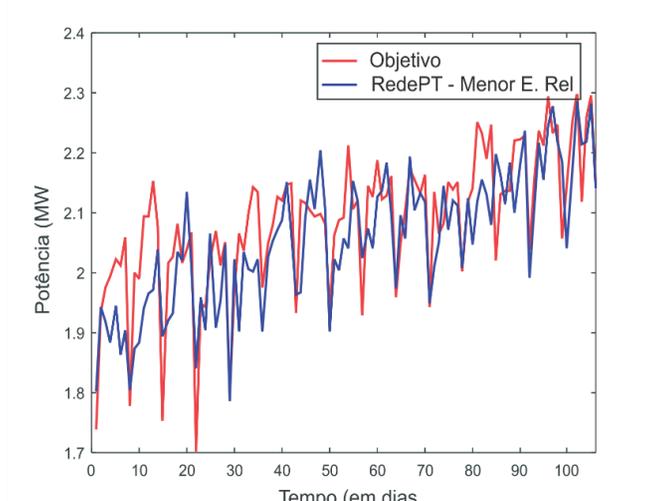


Figura 8 - Previsão da rede de menor erro relativo.

3.2 Previsão considerando apenas a potência como entrada

Na Figura 5 a) está ilustrada a RNA cujas entradas são apenas os valores de potência para a previsão da demanda de potência elétrica. Inicialmente, é realizado o procedimento de treinamento considerando os parâmetros utilizados presentes na seção 2.3.

Após o treinamento de todas as redes, é feita a avaliação a partir dos dados de teste, considerando um período de 106 dias. Na Figura 9, foi esboçado o comportamento do valor absoluto do MAPE para todas as redes encontradas.

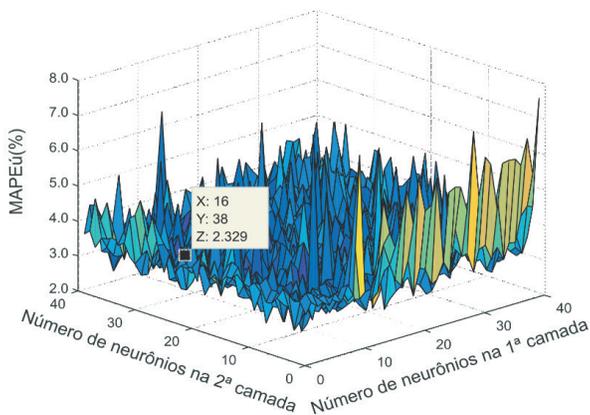


Figura 9 - MAPE considerando apenas a potência.

Portanto, a RNA que apresentou menor valor de MAPE, 2,33%, foi a rede com 16 e 38 neurônios na primeira e segunda camadas, respectivamente. Ademais, a rede com 31 e 5 neurônios na primeira e segunda camadas, respectivamente, foi a que exibiu o menor erro relativo, igual a 6,8%.

Nas Figura 10 e 11 estão os resultados do teste para a RNA de topologia com o menor MAPE e menor erro relativo, respectivamente, para 106 dias. Como no resultado anteriormente apresentado em que a topologia de melhor MAPE apresenta resultado superior, divergindo com menor frequência da curva objetivo quando comparado ao gráfico da Figura 8, no qual a topologia da RNA leva em consideração o menor erro relativo.

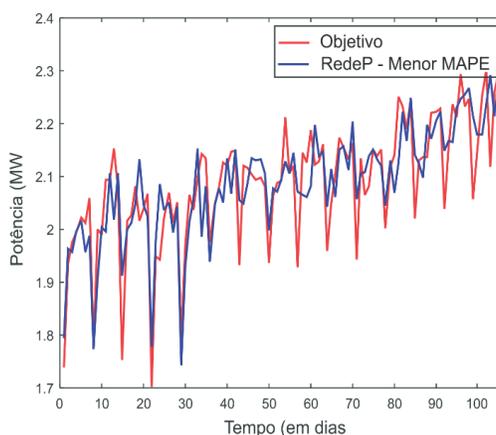


Figura 10 - Previsão da rede de menor MAPE.

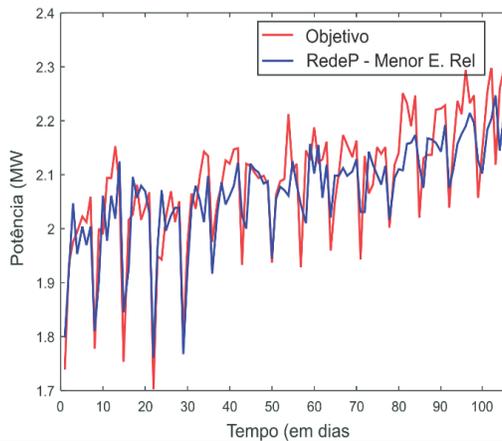


Figura 11 - Previsão da rede de menor erro relativo.

Nota-se que, em ambos os casos, isto é, a rede neural que utiliza o critério de menor MAPE apresenta menor convergência em relação aos picos e vales do sistema ao longo do tempo, quando comparado a rede que considera o menor erro relativo. Este fato, deve-se ao modelo matemático do MAPE, o qual propõem uma medida normalizada, faz a RNA desconsiderar os pontos espúrios que são vistos no sinal real.

Por outro lado, o erro relativo, tende a variar dentro da média do sinal real, como pode ser visto nas Figuras 8 e 11, respectivamente.

Por fim, foi realizada a comparação entre as topologias de redes adotadas, em que “RedeP”, denota a rede que possui apenas a potência como variável de entrada e “RedePT”, denota a rede que possui a potência e a temperatura como variáveis de entrada. O critério adotado foi o erro relativo entre o sinal estimado e o valor real, conforme exposto no gráfico da Figura 12.

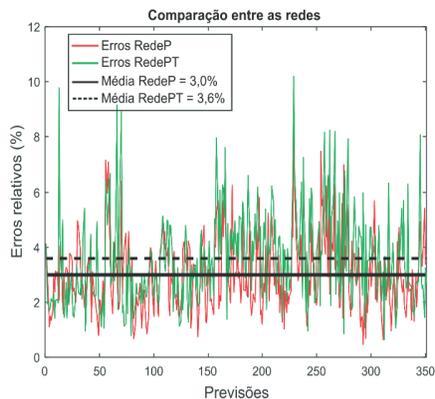


Figura 12 - Comparação considerando os erros relativos.

A Figura 12 ilustra a comparação entre as redes através do erro relativo e pode-se observar que a rede treinada com apenas a potência como entrada, denominada “RNA P”, apresenta menor média de erro relativo, igual a 3%. Enquanto que a rede utilizando dados de potência e temperatura, “RNA PT” apresentam média do erro relativo igual a 3,6%. Portanto, a temperatura influencia negativamente na previsão de demanda neste estudo, devido sua baixa variação no período estudado.

4 | CONCLUSÃO

Em vista de tudo que foi apresentado, nota-se que a temperatura apresenta baixa correlação com a variável de potência desta subestação. Comprovado pelo fato de a média do erro relativo da topologia sem a presença de temperatura ter sido menor que a topologia da RNA que considera a temperatura: 3% e 3,6%, respectivamente.

Outro ponto importante está na estratégia de mapeamento da quantidade de neurônios. Os resultados indicaram que a RNA com apenas potência como entrada, levando em consideração o critério de menor MAPE, apresentou menos neurônios na primeira e segunda camada, quando comparado a RNA com potência e temperatura como entradas. Por outro lado, neste mesmo mapeamento, quando a métrica de comparação para escolha da RNA foi o menor erro relativo, ambas as topologias apresentaram o mesmo número de neurônios na primeira e segunda camada.

Finalmente, o modelo implementado neste trabalho apresenta performance significativa para previsão de demanda em subestações de energia elétrica, ressaltando que a inserção de temperatura não afetou positivamente em melhoria nas previsões. Em trabalhos futuros, o objetivo será analisar regiões do país que apresentem elevada variação de temperatura ao longo do ano.

REFERÊNCIAS

ALI, Sarwan et al. Hour-ahead load forecasting using ami data. **arXiv preprint arXiv:1912.12479**, 2019.

ANDRADE, Luciano Carli Moreira de. **Abordagem neurofuzzy para previsão de demanda de energia elétrica no curtíssimo prazo**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANDRADE, Pedro HM; VILLANUEVA, Juan Moises Mauricio; BRAZ, Helon David Macedo. An Outliers Processing Module based on Artificial Intelligence for Substations Metering System. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2020.

ANWAR, T. et al. Introduction to load forecasting. **Inter. J. Pure Appl. Mathe**, v. 119, p. 1527-1538, 2018.

CARMONA, Diego et al. Electric energy demand forecasting with neural networks. In: **IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02**. IEEE, 2002. p. 1860-1865.

DUDEK, Grzegorz; PELKA, Paweł; SMYL, Slawek. A Hybrid Residual Dilated LSTM end Exponential Smoothing Model for Mid-Term Electric Load Forecasting. **arXiv preprint arXiv:2004.00508**, 2020.

BOX, GC GE Jenkins GM Reinsel; LJUNG, G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Hoboken. 2015.

GHIASSI, M. D. K. Z.; ZIMBRA, David K.; SAIDANE, Hassine. Medium term system load forecasting with a dynamic artificial neural network model. **Electric power systems research**, v. 76, n. 5, p. 302-316, 2006.

HAPUARACHCHI, D. C.; HEMAPALA, K. T. M. U.; JAYASEKARA, A. G. B. P. Long Term Annual Electricity Demand Forecasting in Sri Lanka by Artificial Neural Networks. In: **2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**. IEEE, 2018. p. 290-295.

KAGAN, Nelson; DE OLIVEIRA, Carlos César Barioni; ROBBIA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. Editora Blucher, 2005.

LANG, Christian et al. Electricity Load Forecasting--An Evaluation of Simple 1D-CNN Network Structures. **arXiv preprint arXiv:1911.11536**, 2019.

LEVENBERG, Kenneth. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. **Quarterly of applied mathematics**, v. 2, n. 2, p. 164-168, 1944.

LIAO, Zhifang; PAN, Haihui. Short-term Load Forecasting with Dense Average Network. **arXiv preprint arXiv:1912.03668**, 2019.

MARQUARDT, Donald W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MASSAOUDI, Mohamed et al. A Novel Approach Based Deep RNN Using Hybrid NARX-LSTM Model For Solar Power Forecasting. **arXiv preprint arXiv:1910.10064**, 2019.

MUKAKA, Mavuto M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi medical journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.

PELKA, Paweł et al. Pattern-based Long Short-term Memory for Mid-term Electrical Load Forecasting. **arXiv preprint arXiv:2004.11834**, 2020.

RIBEIRO, P. M. et al. Sistema computacional para previsão de demanda por energia em pontos de suprimento e subestações da COELBA. **XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica—SENDI. Belo Horizonte**, 2006.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira; HADDAD, Jamil; CRUZ, Ricardo Alexandre Passos da. Planning the expansion of distribution: technical and regulatory considerations; Planejamento da expansão da distribuição: considerações técnicas e regulatórias. 2008.

SONMEZ, Mustafa; AKGÜNGÖR, Ali Payidar; BEKTAŞ, Salih. Estimating transportation energy demand in Turkey using the artificial bee colony algorithm. **Energy**, v. 122, p. 301-310, 2017.

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