

Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



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 – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
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. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
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. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
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^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
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. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
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 Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

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

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

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

Engenharia elétrica: o mundo sob perspectivas avançadas

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: o mundo sob perspectivas avançadas / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-013-8
DOI 10.22533/at.ed.138211305

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

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

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

FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN

Carolina Barbosa Amaro Dias

DOI 10.22533/at.ed.1382113051

CAPÍTULO 2..... 14

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Laura Vieira Maia de Sousa

Paula Meyer Soares

DOI 10.22533/at.ed.1382113052

CAPÍTULO 3..... 30

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA UFAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE)

Pedro Henrique Melo Costa

Thiago Melo de Lima

Antonio Carlos Alves de Farias

Rennard de Oliveira Brito

DOI 10.22533/at.ed.1382113053

CAPÍTULO 4..... 44

ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF

Licinius Dimitri Sá de Alcantara

Mayara Soares Campos

DOI 10.22533/at.ed.1382113054

CAPÍTULO 5..... 57

TÉCNICA PREDITIVA DE SEGUIMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA GLOBAL DE ARRANJOS FV EM SOMBREAMENTO PARCIAL

Paulo Robson Melo Costa

Lucas Taylan Ponte Medeiros

Isaac Rocha Machado

Marcus Rogério de Castro

DOI 10.22533/at.ed.1382113055

CAPÍTULO 6..... 76

ANÁLISE DE TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V APLICADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Ana Lyvia Pereira Lima de Araújo

Arthur Vinicius dos Santos Lopes

Adson Bezerra Moreira

DOI 10.22533/at.ed.1382113056

CAPÍTULO 7	94
METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO E MANEJO DE CARGA APLICADA A CONSUMIDORES RESIDENCIAIS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	
Andrei da Cunha Lima	
Laura Lisiane Callai dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.1382113057	
CAPÍTULO 8	113
ESTUDO DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DE ÚNICO ESTÁGIO COM CONEXÃO DIRETA AO SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO	
Lucas Taylan Ponte Medeiros	
Paulo Robson Melo de Costa	
Ângelo Marcilio Marques dos Santos	
Leonardo Pires de Sousa Silva	
Denisia de Vasconcelos Mota	
Adson B. Moreira	
DOI 10.22533/at.ed.1382113058	
CAPÍTULO 9	129
ESTUDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	
André Favetta	
Daniel Augusto Pagi Ferreira	
Maurício José Bordon	
DOI 10.22533/at.ed.1382113059	
CAPÍTULO 10	142
ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO.	
Neolmar de Matos Filho	
Dênio Alves Cassini	
Túlio Pinheiro Duarte	
Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.13821130510	
CAPÍTULO 11	156
THE IMPACT OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL ELECTRICAL PARAMETERS ON LIGHTNING OVERVOLTAGES DEVELOPED IN A 138 KV TRANSMISSION LINE	
Felipe Mendes de Vasconcellos	
Fernando Augusto Moreira	
Rafael Silva Alípio	
DOI 10.22533/at.ed.13821130511	
CAPÍTULO 12	170
A INFLUÊNCIA DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO SOBRE O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
Felipe Mendes de Vasconcellos	

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130512

CAPÍTULO 13..... 189

AVALIAÇÃO DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO NA RESPOSTA IMPULSIVA DO ATERRAMENTO E NAS SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Felipe Mendes de Vasconcellos

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130513

CAPÍTULO 14..... 207

CONVERSORES E INVERSORES PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO

Moisés de Mattos Dias

Niklaus Veit Lauxen

Marco Antônio Fröhlich

Claudionor Atílio Vingert

Giuseppe Guilherme Mergener Vingert

Luiz Carlos Gertz

Alessandro Sarmiento dos Santos

José Lesina Cezar

Patrice Monteiro de Aquim

Jonathan Moling

Gabriel Mateus Neumann

Nickolas Augusto Both

Monir Goethel Borba

Lirio Schaeffer

DOI 10.22533/at.ed.13821130514

CAPÍTULO 15..... 221

ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FRENAGEM REGENERATIVA E SEU IMPACTO NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR BATERIAS

Gabriel Silva de Marchi Benedito

Daniel Augusto Pagi Ferreira

DOI 10.22533/at.ed.13821130515

CAPÍTULO 16..... 238

PATH PLANNING COLLISION AVOIDANCE USING REINFORCEMENT LEARNING

Josias Guimarães Batista

Emerson Verar Aragão Dias

Felipe José de Sousa Vasconcelos

Kaio Martins Ramos

Darielson Araújo de Souza

José Leonardo Nunes da Silva

DOI 10.22533/at.ed.13821130516

CAPÍTULO 17	252
CONTROLE DE PRECISÃO PARA PRÓTESES MECÂNICAS	
Haniel Nunes Pereira Pinheiro	
Ronaldo Domingues Mansano	
DOI 10.22533/at.ed.13821130517	
CAPÍTULO 18	266
ESTUDO DA VIABILIDADE DO MEDIDOR DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA FLOW™ E ADAPTAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS	
Camila de Souza Gomes	
Ana Carolina Silva de Aquino	
Gabriela Haydee Mayer de Figueiredo Barbosa	
Maria Eduarda Santos Amaro	
Sergio Murilo Castro Cravo de Oliveira	
Lilian Regina de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.13821130518	
CAPÍTULO 19	280
OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO	
Gustavo Krause Vieira Garcia	
Antonio Lucas dos Santos Carlos	
Neemias Dantas Fernandes	
Taciano Amaral Sorrentino	
DOI 10.22533/at.ed.13821130519	
CAPÍTULO 20	297
ESTUDO DA SECAGEM SOLAR DE BIOMASSA DE LARANJA COM CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA	
Mariana de Miranda Oliveira	
Leandro Antônio Fonseca Domingues	
Andrea Lucia Teixeira Charbel	
DOI 10.22533/at.ed.13821130520	
CAPÍTULO 21	307
ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CAPACITOR TÉRMICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA	
Brenda Fernandes Ribeiro	
Antonio Gomes Nunes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130521	
CAPÍTULO 22	321
MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO TIPO GANGORRA DE EIXO ÚNICO	
Reinel Beltrán Aguedo	
Ricardo José de Farias Silva	
Ania Lussón Cervantes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130522	

CAPÍTULO 23.....335

DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS NO RIO GRANDE DO NORTE

Paulo Vinícius de Souza Oliveira
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra
Luiz José de Bessa Neto
Vitória Caroline Carvalho do Nascimento

DOI 10.22533/at.ed.13821130523

CAPÍTULO 24.....350

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DIDÁTICA COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EM UM AMBIENTE DE CÓDIGO ABERTO - SCIENTIFIC LABORATORY (SCILAB)

Matheus Silva Pestana
Danúbia Soares Pires
Orlando Donato Rocha Filho

DOI 10.22533/at.ed.13821130524

CAPÍTULO 25.....363

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO APLICADO A CONSTRUÇÃO CIVIL

Mauricio Andrade Nascimento
Ednildo Andrade Torres

DOI 10.22533/at.ed.13821130525

CAPÍTULO 26.....391

MONITORAÇÃO REMOTA DE RESERVATÓRIOS LÍQUIDOS UTILIZANDO O MÓDULO ESP32-LoRa

Maria Eduarda Aparecida Gil
Thiago Timoteo Henrique
Getúlio Teruo Tateoki

DOI 10.22533/at.ed.13821130526

CAPÍTULO 27.....397

S.A.C SISTEMA DE ASSISTÊNCIA AO CICLISTA

Ricardo Bussons da Silva
Alexandre Henrique Ferreira Rodrigues
Deivid Roberto Almeida Vasconcellos
Rian Guilherma Braga de Lima
San-Cleir Neto Silva Orlanlandes
Victor Manoel Rosa de Moraes

DOI 10.22533/at.ed.13821130527

CAPÍTULO 28.....402

UMA ABORDAGEM BASEADA EM APRENDIZADO DE MÁQUINA E DESCRITORES ESTATÍSTICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Lucas de Oliveira Soares

Luiz Alberto Pinto
Diego Assereuy Lobão

DOI 10.22533/at.ed.13821130528

SOBRE OS ORGANIZADORES	415
ÍNDICE REMISSIVO.....	416

THE IMPACT OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL ELECTRICAL PARAMETERS ON LIGHTNING OVERVOLTAGES DEVELOPED IN A 138 KV TRANSMISSION LINE

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão 31/01/2021

Felipe Mendes de Vasconcellos

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/0508094462424211>

Fernando Augusto Moreira

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/8068628216980918>

Rafael Silva Alípio

Departamento de Engenharia Elétrica, Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais
Belo Horizonte – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/6715701375569983>

ABSTRACT: This study evaluates the overvoltages developed due to direct lightning strokes to a 138-kV transmission line tower top comparing constant and frequency-dependent soil parameters. ATP (Alternative Transients Program) was used to simulate the phenomena. The inclusion of the frequency-dependent soil parameters causes a percentage decrease of the overvoltage peaks when compared with constant soil parameters of around 15% to 33% for first strokes considering values of soil resistivity of 500 Ω .m and 2.500 Ω .m. It was also studied the counterpoise cables length reduction in order

to maintain equivalent overvoltage levels to those of simulations with constant parameters. This reduction ranged from 25 to 55%, which could contribute to economic gains as well as operational efficiency in the grounding systems and transmission line construction time. Therefore, disregarding the frequency dependence of the soil parameters in simulations may lead to an overly conservative estimation of the lightning performance of the transmission line.

KEYWORDS: ATP; ground permittivity; ground resistivity; lightning; transmission line.

O IMPACTO DA DEPENDÊNCIA DE FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO EM SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS DESENVOLVIDAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 KV

RESUMO: Este estudo avalia as sobretensões desenvolvidas devido à incidência direta de descargas atmosféricas em uma torre de transmissão de 138 kV comparando parâmetros de solo constantes e dependentes de frequência. O ATP (Alternative Transients Program) foi utilizado para simular os fenômenos. A inclusão dos parâmetros de solo dependentes da frequência provoca uma diminuição percentual dos picos de sobretensão quando comparados com parâmetros de solo constantes de cerca de 15% a 33% para as primeiras descargas de retorno considerando valores de resistividade do solo de 500 Ω .m e 2.500 Ω .m. Também foi estudada a redução do comprimento dos cabos de contrapeso a fim de manter níveis de sobretensão equivalentes aos das simulações

com parâmetros constantes. Esta redução variou de 25 a 55%, o que poderia contribuir para ganhos econômicos bem como eficiência operacional nos sistemas de aterramento e tempo de construção de linhas de transmissão. Portanto, ignorar a dependência da frequência dos parâmetros do solo nas simulações pode levar a uma estimativa excessivamente conservadora do desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas.

PALAVRAS - CHAVE: ATP, permissividade do solo, resistividade do solo, descargas atmosféricas, linhas de transmissão.

1 | INTRODUCTION

Lightning is a recurring cause of transmission line failures. Generally, it is responsible for more than 50% of unscheduled line outages. These failures happen when lightning strikes the line and the overvoltages developed across line-insulators exceed their lightning withstand voltage. The backflashover is widely prevalent in lines set up in zones of soils with medium and high resistivity. This event can occur when lightning strikes a tower (or the shield wires) and the voltage wave that flows to the ground finds a high tower-footing impedance. When this occurs, extremely high grounding potential rises are developed and transmitted to the tower top. High overvoltages might be experienced across the phase insulators. If such overvoltages exceed the withstand voltage, backflashover may occur (Visacro et al. 2015).

Hence, the assessment of the lightning performance of transmission lines involves the evaluation of the overvoltages developed across insulator strings, in response to lightning strikes to the line (Electrical Transmission and Distribution Reference book, 1964).

Recent papers have determined how significant is the influence of frequency dependence of soil resistivity and permittivity on the response of grounding electrodes subject to lightning currents (Visacro et al. 2011; Visacro and Alipio, 2012; Akbari et al. 2013).

This paper particularly investigates how the frequency dependence of soil parameters (resistivity ρ and permittivity ϵ) influences the lightning overvoltage across insulators due to direct strikes to the line leading to the occurrence of backflashovers. In this work, the associated effects with the soil ionization process are not considered due to the long counterpoise cables usually used in transmission line grounding systems, making this effect negligible without loss of consistency of the results obtained (Visacro, 2007).

2 | MODELLING AND METHODOLOGY

2.1 Soil parameters frequency dependence

Although it is well known that soil resistivity and permittivity present important frequency dependence, the response of grounding electrodes is usually simulated assuming constant values for both soil parameters. In the absence of accurate equations to calculate

the frequency dependence of such parameters, this influence is frequently disregarded. In a common procedure, the resistivity is presumed as the value measured at low frequency and the relative permittivity of soil is considered to vary from 4 to 81, according to the soil humidity (Visacro, 2007).

Recently, a different technique for determining the frequency variation of soil resistivity and permittivity in practical conditions was developed and experimentally validated (Visacro et al. 2011). It was methodically tested to distinct soils to determine generic equations (1) and (2) to predict these parameter behaviors in the illustrative spectrum of dominant frequencies of lightning currents (Visacro and Alipio, 2012):

$$\rho_r = \{1 + [1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0.73}]\} \cdot [(f - 100)^{0.65}]^{-1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = 7.6 \cdot 10^3 f^{-0.4} + 1. \quad (2)$$

In these equations, suited to the 100 Hz – 4 MHz limits, is the relative resistivity, is the relative permittivity at frequency f in Hz and is the soil resistivity at 100 Hz.

2.2 Computational Simulation

To simulate the impact of the frequency dependence of the soil parameters in the overvoltages developed in the insulator strings of a 138 kV transmission line when struck by lightning, the first step is to select the most suitable models for each element (transmission tower, transmission line, grounding system, and lightning current) considering the transient aspects intrinsic to the phenomenon. Thus, in this section, models adopted in this work for these elements will be presented.

1) Lightning Current:

The lightning current was represented using a current source according to the model proposed by Heidler et al. (1999) available in ATP and defined by:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (3)$$

where

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right], \quad (4)$$

and

- I_0 = Peak value of the current (kA);
- τ_1 = Time constant of the current rise (μ s);
- τ_2 = Time constant of the current decay (μ s);
- η = Correction factor of the current peak;
- n = Current steepness factor.

2) Transmission Tower:

The tower was modeled by lossless lines. In this model, each section of the transmission tower is represented by short lines without losses that corresponds to a cylindrical conductor with equivalent radius. The values of the surge impedance are calculated according to the dimensions and the geometric configuration of each section of the tower. The model is represented in Fig. 1 (De Vasconcellos and Moreira, 2017).

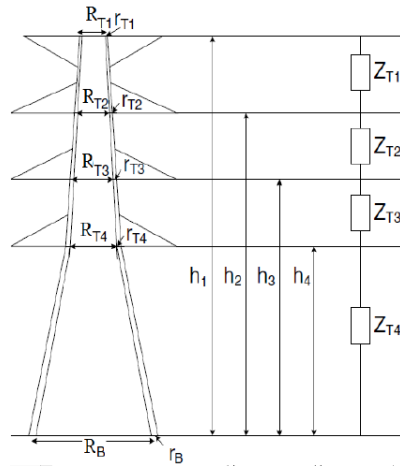


Fig. 1. Model of transmission tower by lossless lines.

3) Transmission Line:

The transmission line was modeled by the ATP Bergeron transmission line model, considering the parameters distributed and calculated for a constant typical dominant frequency, according to lightning current parameters. The line is untransposed and skin effect is taken into account. The coupling between all cables is intrinsic to the model. For the calculation of the parameters, the physical data of each of the conductors are used, such as relative physical position, diameter and ohmic resistance.

4) Grounding System:

The grounding system of the transmission towers is composed of all the metallic elements that compose the tower and that maintains contact with the ground or with the foundations, including rebar, grids, screws, etc. and any grounding devices, such as grounding rods, horizontal rings, counterpoise cables, or any combination of these that are buried in the ground. Soil resistivity is one of the main factors responsible for the performance of the grounding system of a transmission line, being influenced by the following factors: soil type, moisture content, temperature, chemical composition, retained water salt concentration, stratification and soil compaction (De Vasconcellos and Moreira, 2017).

The towers of a transmission line must be grounded in such a way to make the grounding impedance compatible with the desired performance of the line.

The electric model of the counterpoise cables is the nominal π model. The parameter values are obtained through Sunde's (Sunde, 1949) formulations:

$$R = \frac{l}{\pi \cdot r^2} \cdot \rho_c \quad (5)$$

$$G = \frac{\pi}{\rho \cdot l} \cdot \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

$$C = \pi \cdot \epsilon \cdot l \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{2 \cdot \pi} \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1 \right] \quad (8)$$

Where,

- R - Counterpoise cable resistance(Ω);
- G - Counterpoise cable conductance (S);
- C - Counterpoise cable capacitance(F);
- L - Counterpoise cable inductance (H);
- ρ_c - Counterpoise cable resistivity ($\Omega \cdot m$);
- ρ - Soil resistivity ($\Omega \cdot m$);
- l - Counterpoise cable length (m);
- r - Counterpoise cable radius (m);
- $\alpha - \sqrt{2 \cdot r \cdot h}$ (m);
- h - Counterpoise cable bury depth (m);
- μ - Soil permeability (adopted as μ_0) (H/m);
- ϵ - Soil permittivity (F/m).

Each π circuit cell represents a standard section of the cable. The general representation of the counterpoise cable used in the simulations is modeled by j identical cells corresponding each to 1 m of the counterpoise cable, as seen in Fig. 2 (Hatziargyriou and Lorentzou, 1997).

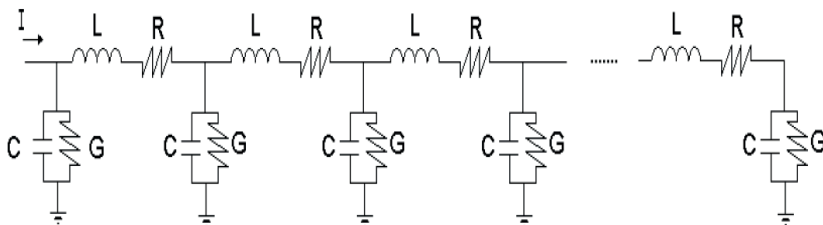


Fig. 2. Counterpoise cable general representation.

2.3 Simulated Conditons

In the simulations, the lightning strikes directly to the top of the central tower, considering two adjacent towers, according to Fig. 3 (De Vasconcellos and Moreira, 2017) and also considering first and subsequent return strokes. It is usual to consider only one adjacent span for the analysis of lightning overvoltages, as the transit time in the tower is much shorter than the transit time in the adjacent spans, so considering an adjacent span is sufficient. Typical values were obtained from measurements at the Morro do Cachimbo - MG station, in Brazil (Visacro et al. 2004), shown in Tables I, where I_p is the lightning current peak, τ_1 is the front time and τ_2 is the tail time. The median and critical classifications are related to the probabilistic characteristic of the measurements, in which “median” refers to measurements in which the values of the parameters associated with the lightning currents exceed in 50% those of the measured cases and “critical” to the measurements in which only 5% of the parameters exceed this set of values.

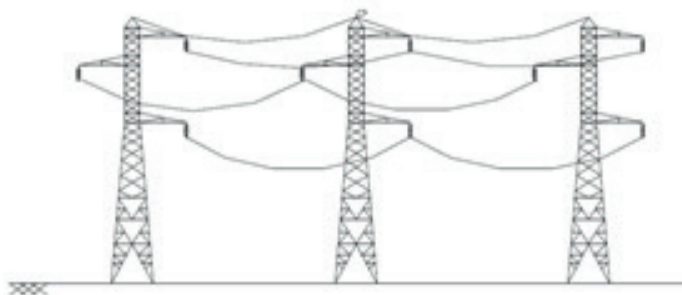


Fig. 3. Lightning strike incidence point illustration.

Lightning Current (type)	I_p (kA)	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)
Median	45.3	5.6	53.5
Critical	85.2	9.9	145.2

TABLE I. First Return Stroke Parameters

Fig. 4 (Salari and Portela, 2007) shows the configuration of the simulated transmission tower, the values of the surge impedance Z_t considered for each segment and the propagation speed of the surge wave, assumed to be 80% of speed of light, implemented in the simulations, respectively. In actual towers, a propagation speed lower than the speed of light is usually attributed to the effect of slants and crossarms (Chisolm, Chow and Srivastava, 1983).

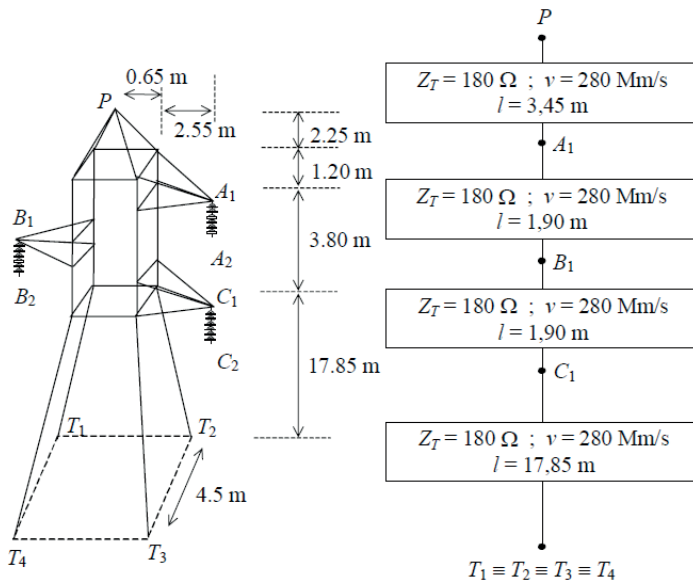


Fig. 4. 138kV transmission tower configuration and tower equivalent circuit.

The transmission line is connected to a 138 kV, 60 Hz voltage source and implemented with a 10 km length in each side of bordering towers (in this case, the reflections do not return before the end of the total study time, not affecting the results, since there is interest only in the maximum overvoltages).

The electrical and mechanical data of the cables of the transmission line are shown in Table II.

Cable name	LINNET	EHS 3/8"
Type	ACSR	EHS Class A
Span length (m)	300	300
Sags (m)	7	4
Internal radius (cm)	0.2976	0
External radius (cm)	0.9155	0.476
CC Resistance (Ω/km)	0.2032	3.81

Table II. Electrical and Mechanical Data of the Cables

For the grounding systems, the arrangement with four 4 AWG copper-steel counterpoise cables were used, placed 60cm below the ground surface, in the longitudinal direction of the line as represented in Fig. 5 (Salari and Portela, 2007). The length of the

counterpoise cables, that vary according to the soil resistivity used in the simulations are presented in the next section with each result set.

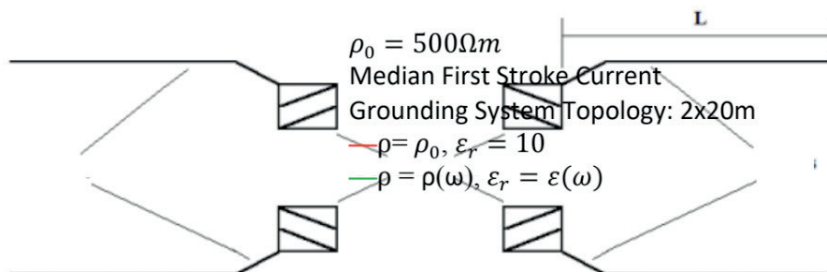


Fig. 5. Grounding arrangement representation with four counterpoise cables.

3 I RESULTS

Overvoltages developed across the upper insulator string (phase with the highest peak overvoltage, in this case) of the central tower of the 138-kV line due to a direct first strike to its top (see Fig. 3 and Table I) are shown in Section 3.1, in Figs. 6, 7, 8, and 9 and in Table III. Simulations assumed the tower configuration of Fig. 5, grounding system topology of Fig. 6, and 300-m long spans. The results considering constant soil parameters in Figs. 6 to 9 and Table III were presented and discussed originally in De Vasconcellos and Moreira (2017) and are being used in this paper to compare with the results considering the inclusion of the frequency dependence of the soil parameters and in accordance to (1) and (2). The frequency values assumed in the simulations are calculated by the inverse of the rising time of each lightning stroke current.

After finding the values of the relative resistivity and permittivity considering the calculated dominant frequency of each lightning current, they are included in all models that involve those parameters. These models are the Bergeron transmission line model and the grounding system, with the calculation of R, G, C and L of the nominal π model based on Sunde's equations with the frequency dependence of the soil parameters. Then the simulations are performed with the variation of the soil parameters as previously described.

The grounding system topologies used in De Vasconcellos and Moreira (2017) were chosen to maintain the overvoltages below the Critical Flashover Overvoltage (CFO) value, in order to reduce the probability of a backflashover occurrence and were kept the same in this work so that the results may be effectively compared.

Figures from 6 to 9 presents the overvoltage waves developed across the upper insulator string of the line under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters, with median and critical parameters and resistivities of ρ_0 and $\rho(\omega)$. Each figure has its parameters depicted on itself.

3.1 First stroke currents

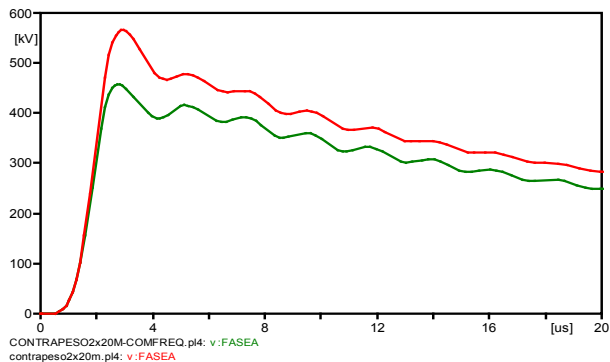


Fig. 6. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 1.

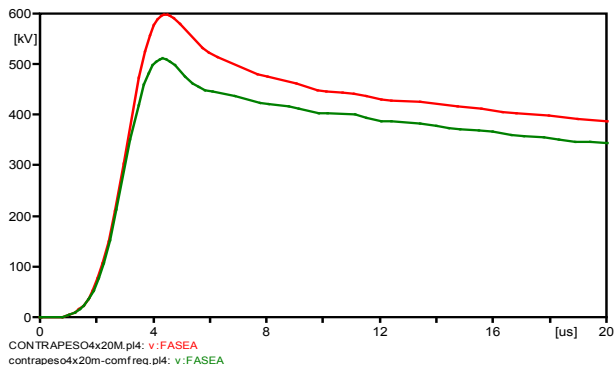


Fig. 7. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 2.

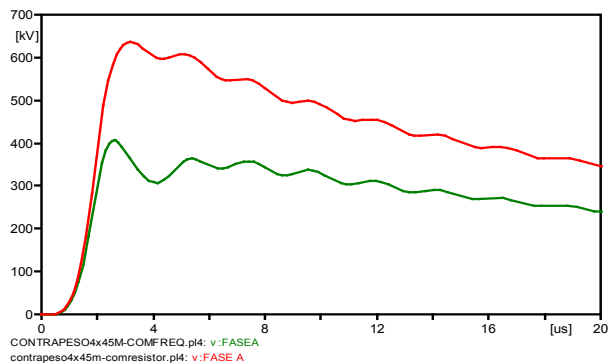


Fig. 8. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 3.

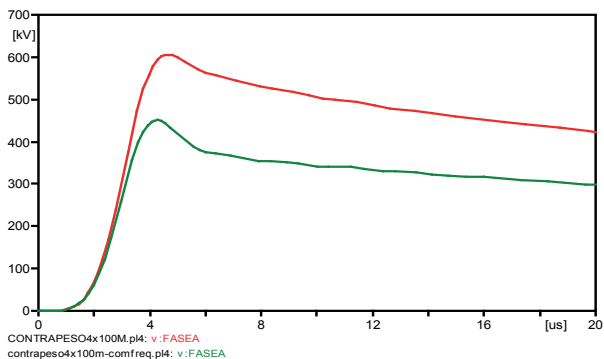


Fig. 9. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 4.

ρ_0 ($\Omega.m$)	L (m)	Overvoltage (kV) - Upper Insulator String		
		Ip = 45.3kA; $\tau_1 = 5.6\mu s$; $\tau_2 = 53.5\mu s$		
		$\rho = \rho_0$ $\epsilon_r = 10$	$\rho(\omega)$ $\epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
500	2x20m	565	458	-23%
2.500	4x45m	607	406	-33%
ρ_0 ($\Omega.m$)	L (m)	Ip = 85.2kA; $\tau_1 = 9.9\mu s$; $\tau_2 = 145.2\mu s$		
		$\rho = \rho_0$ $\epsilon_r = 10$	$\rho(\omega)$ $\epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
		500	4x20m	598
2.500	4x100	610	451	-26%

Table III. Peak Overvoltage Across the Upper Insulator String of the 138-kV Line for 500 and 2.500 $\Omega.m$ for Median and critical Lightning Parameters.

The results presented in Table III demonstrate that, as expected, taking into account the frequency dependence of soil parameters produces a general decrease of overvoltage levels and this consequence is more significant as higher the soil resistivity is. This decrease is far more significant for overvoltages developed due to first strokes, varying from around 15% to 33% for soils with of 500 and 2.500 $\Omega.m$, respectively.

The overvoltage peak values developed for first strokes indicate that considering the frequency dependence of soil resistivity and permittivity would lead to a downward trend in the number of backflashovers, since the magnitude of the overvoltages were decreased. It also contributes to keeping the peak voltages below the CFO, which is considered as 650kV for 138-kV lines, in the simulations, obtaining a more accurate and less overly conservative

estimation of the lightning performance of transmission lines.

From the results previously presented, simulations were performed to study the possibility of reducing the counterpoise cable lengths, in the case of first stroke currents to make the grounding system of the line also more efficient and less conservative.

Then, in section 3.2, in Figs. 10, 11, 12, and 13, the graphs resulting from this study are presented, with the reduction of the counterpoise cables. It were reduced until the peak overvoltages reached equivalent values (values 10% above or below) to the cases shown in section A, for constant soil parameters. These figures either presents the overvoltage waves developed across the upper insulator string of the line under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters, with median and critical parameters and resistivities of $500\Omega\text{m}$ and $2.500\Omega\text{m}$. Each figure has its parameters depicted on its legends.

The simulations result and the counterpoise cable lengths variation are summarized in Table IV.

3.2 Counterpoise cable length reduction

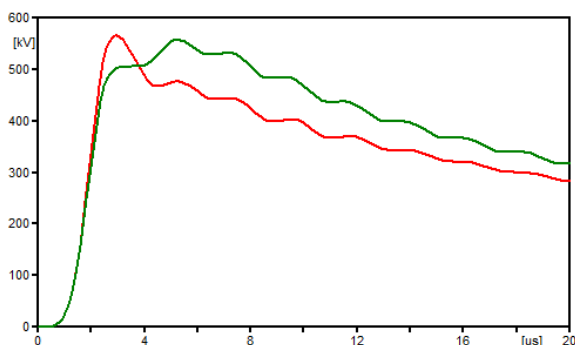


Fig. 10. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 1.

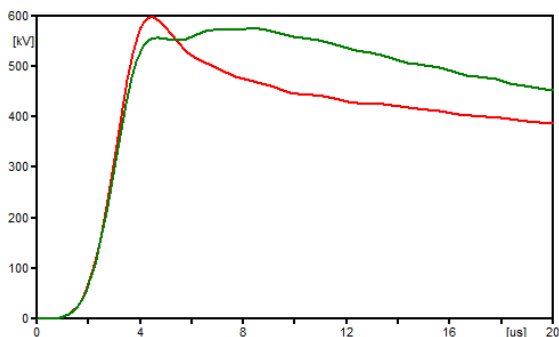


Fig. 11. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 2.

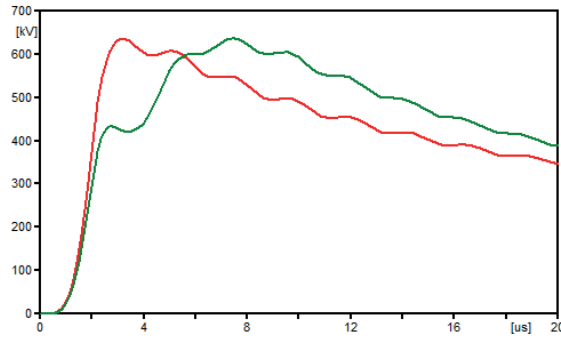


Fig. 12. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 3.

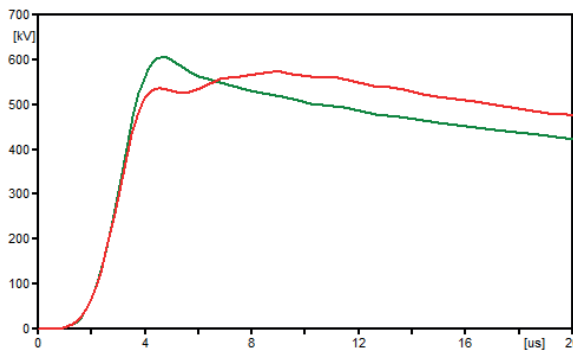


Fig. 13. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 4.

ρ_0 ($\Omega.m$)	Counterpoise Cable Length (m)					
	$I_p = 45.3kA;$ $\tau_1 = 5.6\mu s; \tau_2 = 53.5\mu s$			$I_p = 85,2kA;$ $\tau_1 = 9,9\mu s; \tau_2 = 145.2\mu s;$		
	$\rho = \rho_0$	$\rho(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho = \rho_0$	$\rho(\omega)$	$\Delta(\%)$
	$\epsilon_r = 10$	$\epsilon(\omega)$		$\epsilon_r = 10$	$\epsilon(\omega)$	
500	2x20	2x13	-35%	4x20	4x15	-25%
2.500	4x45	4x20	-55%	4x100	4x60	-40%

Table IV. Counterpoise Cables Length Reduction Maintaining Equivalent Overvoltage Levels Across the Upper Insulator String of the 138-kV Line for considered conditions.

The graphs from section 3.2 and Table IV show that including the frequency dependence of soil parameters in the simulations could contribute to a significant decrease of counterpoise cable lengths, in order to maintain equivalent overvoltage levels compared

to constant soil parameters simulations. This reduction ranged from 25 to 55%, being more prominent for higher soil resistivity values.

This percentage reduction is higher than the overvoltages reduction shown in tables III. It occurs because when the frequency dependence of the electrical soil parameters is included, the conductance of the counterpoise cables represented by the nominal π model is increased and it contributes to the reduction of resulting overvoltages from the lightning strikes. As a result, it becomes possible to moderately reduce the cables length and maintain equivalent overvoltage levels compared with the constant soil parameters simulations and below the CFO of a 138 kV transmission line.

The inclusion of the frequency dependence of the electrical soil parameters is responsible for the differences seen in the overvoltage waveforms behavior in the simulations shown in section 3. It results in a tower footing impedance with a stronger capacitive behavior than in cases when constant parameters are considered. This may be noted by the delay in the voltage wave (the peak is reached later).

4 | CONCLUSIONS

The inclusion of the frequency-dependent soil parameters generates an important decrease of overvoltages for transmission lines. This decrease is relevant for first stroke currents (from about 15% to 33% for soils of 500 and 2.500 Ω .m, respectively).

As a consequence of the previous results, it was also studied the possibility of reducing the length of the counterpoise cables in order to maintain overvoltage levels equivalent to those of simulations considering constant parameters. It was shown that it would be possible to reduce the length of the transmission line counterpoise cables by 25 to 55%, which could contribute to gains of both economic and operational efficiency on the grounding systems and also on the transmission line construction time.

The simulated results suggest a relevant improvement of the lightning performance of the studied line if the simulations include the frequency dependence of the soil electrical parameters and demonstrate the generalization of the influence of this behavior on determining transmission line overvoltages.

The simulated conditions used in this work corresponds to a first investigation and other aspects will be added in the future, for example, the randomness of the parameters of the lightning current and the value of the 60 Hz phase voltages at the moment of the lightning incidence, after all, these parameters could impact the achieved results.

REFERENCES

Akbari, M; Sheshyekani, K. and Reza Alemi, M (2013). The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 4, pp. 739–746.

De Vasconcellos, F. M. and Moreira, F. A (2017). Evaluation and Dimensioning of Grounding Systems for Outage Reduction due to Backflashover in Transmission Lines, in *Proc. 12th Latin-American Congresson Electricity Generation and Transmission*, pp.136.

Electrical Transmission and Distribution Reference book (1964), Central Station of Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, East Pitsburg, Pensilvania, 4th Edition.

Hatzigiorgiou, N. D. and Lorentzou, M (1997). Grounding Systems Design Using EMTP, *23rdEuropean EMTP Users Group Meeting*, Barcelona.

Heidler, F; Cvetic, J. M. and Stanic, B. V (1999). Calculation of lightning current parameters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no 2, pp.399-404.

Salari, J. C. and Portela, C (2007). A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, pp. 527-536.

Sunde, E.D (1949). *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, Dover Publ. New York.

Visacro, S; Soares Jr, A and Schroeder, M. A. O et al (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbostation, *J. Geophys. Res.* (109), D01105, doi:10.1029/ 2003JD003662.

Visacro, S (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386.

Visacro, S; Alipio, R; M. Vale, M. H. and Pereira, C (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity, *IEEE Trans. Electromagn.Compat.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–406.

Visacro, S and Alipio, R (2012). Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935.

Visacro, S; Silveira, F. H; M. Vale, M. H. (2015), Simplified representation of tower-footing electrodes for assessment of the lightning performance of transmission lines using EMTP-based platforms, in *International Conference on Power Systems Transients*.

W. A. Chisolm, Y. L. Chow, and K. D. Srivastava (1983), "Lightning surge response of transmission towers," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS102, no. 9, pp. 3232–3242, Sep. 1983.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizagem 33, 238, 239, 251, 332, 350, 351, 352, 357, 359, 361, 362

ATP 156, 157, 158, 159, 170, 171, 173, 176, 177, 179, 189, 191, 192, 195, 196, 198, 255

Autonomia veicular 221

B

Backflashover 157, 163, 169, 170, 171, 172, 181, 182, 183, 184, 185, 190

C

Cargas Variáveis 76, 92

Célula fotovoltaica 61, 115, 116, 129, 145

Confiabilidade 2, 142, 143, 145, 151, 152

Conversores 8, 58, 59, 85, 86, 207, 208, 214, 216, 219

D

Dados Meteorológicos 38, 42, 44, 54

Descarbonização 14, 16, 17, 18, 23

Descargas Atmosféricas 156, 157, 170, 171, 174, 176, 183, 185, 189, 191, 193, 195, 204

Desempenho 5, 7, 6, 7, 47, 54, 76, 77, 78, 80, 86, 91, 92, 113, 117, 125, 127, 142, 145, 147, 151, 153, 157, 170, 171, 172, 176, 178, 185, 190, 197, 208, 212, 219, 224, 225, 226, 229, 232, 233, 234, 237, 251, 320, 321, 322, 323, 332, 348, 349, 395, 400, 402, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 413

Desenvolvimento 6, 1, 2, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 28, 30, 31, 37, 38, 42, 45, 51, 76, 94, 111, 114, 130, 143, 153, 208, 209, 212, 213, 219, 220, 223, 229, 236, 252, 258, 263, 264, 268, 269, 275, 277, 282, 289, 296, 307, 308, 320, 322, 323, 333, 334, 348, 351, 352, 357, 361, 364, 365, 367, 368, 370, 372, 374, 376, 388, 389, 391, 398, 400, 404

E

Eficiência Energética 6, 16, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 45, 209, 219, 222, 237, 363, 365, 367, 374, 378, 380, 387, 390

Energia fotovoltaica 7, 40, 77, 96, 113, 129, 130, 131, 135, 137, 374

Energia Solar 16, 30, 33, 34, 44, 45, 46, 47, 49, 51, 55, 56, 77, 78, 95, 130, 133, 138, 140, 141, 143, 152, 208, 219, 287, 294, 297, 298, 301, 308, 320, 335, 336, 337, 341, 344

F

Fontes Renováveis 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 77, 115, 131, 143

Frenagem Regenerativa 8, 221, 222, 223, 236, 237

G

Geração de Trajetória 239

GMPPT 57, 58, 75

I

Inversores 8, 136, 138, 207, 208, 210

Irradiação Incidente 44, 55

M

Manipulador Robótico 238, 239

Módulo fotovoltaico 62, 76, 77, 78, 84, 90, 91, 117, 119, 129, 131, 145, 146, 150, 151, 290

Módulos Fotovoltaicos 7, 33, 34, 61, 62, 63, 76, 77, 79, 83, 92, 99, 107, 110, 117, 122, 124, 130, 131, 135, 142, 143, 145, 146, 147, 149, 151, 152, 153

P

Painéis Fotovoltaicos 7, 44, 47, 51, 55, 76, 77, 83, 97, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 139, 140

Parâmetros elétricos do solo 156, 170, 171, 172, 180, 181, 182, 184, 185, 191, 198, 200, 201, 203

Permissividade do solo 157, 171, 178, 185, 189, 190, 197, 203

Pesquisa 5, 6, 23, 25, 29, 30, 31, 34, 37, 40, 41, 42, 43, 56, 96, 132, 143, 152, 222, 266, 268, 276, 277, 278, 298, 305, 350, 352, 362, 371, 372, 375, 379, 381, 382, 398, 400, 404

Planejamento de Caminho 239

Prevenção de Colisão 239

Q

Qualidade de Energia 41, 113

R

Reforço 238, 239, 361

Resistividade do solo 156, 157, 170, 171, 172, 173, 177, 181, 182, 183, 184, 185, 189, 190, 191, 192, 193, 196, 198, 200, 203, 204

Robótica 1, 251

S

Sensores 6, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 39, 40, 58, 59, 66, 80, 104, 105, 119, 208, 287, 288, 289, 290, 300, 396, 403

Setor Elétrico 6, 14, 24, 25, 26, 27, 37

Sinais 1, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 28, 105, 213, 215, 216, 254, 256, 259, 266, 267, 271, 275,

279, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 412

Sistemas de aterramento 157, 170, 171, 177, 190, 191, 196, 198, 203

Sistema Solar Fotovoltaico (FV) 113

Sombreamento Parcial 6, 57, 58, 60, 62, 64, 65, 74, 84

SPPMG 57, 58, 59, 60, 63, 70, 71, 72, 73, 74

T

Topologia de Estágio Único 113, 122, 126

Traçador de curva I-V 6, 76, 77

Transição Energética 6, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29


Trilhas de Caracol 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153

V

Veículo Elétrico 8, 207, 208, 209, 210, 212, 217, 219, 221, 222, 223, 224, 236, 237

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br