

**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  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador  
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

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

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

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

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

#### **Linguística, Letras e Artes**

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

#### **Conselho Técnico Científico**

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

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

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

## Engenharia elétrica: 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](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto: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 eletricista 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

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN Carolina Barbosa Amaro Dias DOI 10.22533/at.ed.1382113051	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES Laura Vieira Maia de Sousa Paula Meyer Soares DOI 10.22533/at.ed.1382113052	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>30</b>
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	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>44</b>
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	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>57</b>
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	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>76</b>
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	

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

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

**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**

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>415</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>416</b>

## A INFLUÊNCIA DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO SOBRE O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão 25/01/2021

### 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>

**RESUMO:** Este estudo avalia o desempenho de uma linha de transmissão de 138 kV frente a descargas atmosféricas sob as premissas de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência. Um modelo de banda-larga foi utilizado para incluir o comportamento dependente da frequência da impedância do sistema de aterramento da torre. As sobretensões através das cadeias de isoladores foram simuladas utilizando o ATP e considerando formas de onda representativas de correntes de primeiras descargas. As taxas de desligamento por *backflashover* foram

determinadas usando o método do Efeito Disruptivo (DE). Foi constatado que a diminuição da resistividade e permissividade relativa do solo resultante do efeito da dependência da frequência é responsável pela diminuição significativa das taxas de desligamento esperadas da linha testada, variando entre 29 e 55% para distribuições realísticas de resistividade do solo ao longo das linhas e uma consequente melhoria relevante no desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas.

**PALAVRAS - CHAVE:** linhas de transmissão, sistemas de aterramento, parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência, desempenho frente a descargas atmosféricas, backflashover.

### THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY DEPENDENT BEHAVIOR OF GROUND ELECTRICAL PARAMETERS ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

**ABSTRACT:** This study evaluates the lightning performance of a 138 kV transmission line under the premises of constant and frequency-dependent soil electrical parameters. A wideband model was used to include the frequency-dependent impedance behavior of the tower grounding system. The overvoltages across the insulator strings were simulated using ATP and considering representative first stroke current waveforms. Backflashover outage rates were determined using the Disruptive Effect (DE) method. It was found that the decrease of soil resistivity and relative permittivity resulting from the frequency dependence effect is responsible for the significant decrease of the expected

outage rates of the tested line, in a range of 29-55% for realistic distributions of soil resistivity along the line and a consequent relevant improvement of the lightning performance of the line. **KEYWORDS:** transmission lines; grounding systems, frequency-dependent soil electrical parameters, lightning performance, backflashover.

## 1 | INTRODUÇÃO

A incidência de descargas atmosféricas é uma causa frequente de interrupção de linhas de transmissão. Descargas diretas à linha desenvolvem sobretensões através da cadeia de isoladores que podem resultar em ruptura do isolamento, levando a faltas (Visacro, 2007b; Visacro, Silveira and De Conti, 2012). O *backflashover* prevalece como o principal mecanismo responsável pelos desligamentos de origem atmosférica de linhas de classe de tensão abaixo de 500 kV instaladas em regiões com resistividade do solo desfavorável (Visacro, 2007b). A impedância de aterramento do “pé” da torre tem grande influência na amplitude das sobretensões de origem atmosférica (Chisholm, Chow, and Srivastava, 1983; Visacro, Silveira and De Conti, 2012), e esta é a razão da prática bastante usual de reduzir esta impedância para melhorar o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas. (Visacro, 2007b; Visacro, Silveira and De Conti, 2012).

Diversos estudos demonstram quão significativa é a influência da dependência da frequência nos parâmetros resistividade e permissividade do solo na resposta dos eletrodos de aterramento sujeitos a correntes de descargas atmosféricas (Visacro et al., 2011; Visacro and Alipio, 2012, Alipio and Visacro, 2013; Akbari, Sheshyekani and Reza Alemi, 2013; Alipio and Visacro, 2014a). Neste cenário, se torna interessante avaliar qual o impacto correspondente no desempenho das linhas de transmissão, em termos de variação da taxa de desligamento por *backflashover*, e é isto que este trabalho visa investigar.

Investigações análogas podem ser encontrada em outros estudos (Visacro et al., 2012; Visacro and Silveira, 2015). Contudo, a aplicação do modelo HEM (*Hybrid Electro Magnetic Model*) para simular os resultados de todo o sistema de transmissão resulta em um grande esforço computacional. Assim, este trabalho possui o objetivo de apresentar uma solução computacionalmente eficiente, e que permita a interface de uma modelagem de banda larga de sistemas de aterramento com o *Alternative Transients Program* – ATP (Prikler and Hoidalén, 2009), a fim de avaliar com precisão a influência e o impacto do comportamento dependente da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre a taxa de desligamento de linhas de transmissão por *backflashover*.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é descrita brevemente a metodologia e as modelagens utilizadas, na seção 3 os resultados numéricos são apresentados e analisados e na seção 4 são expostas as conclusões.

## 2 | METODOLOGIA E MODELAGENS

A simulação das sobretensões de origem atmosférica e o estudo correspondente do desempenho da linha de transmissão foram realizados considerando a incidência de primeiras descargas retorno típicas, medidas em torre instrumentada no Morro do Cachimbo – MG (Visacro et al., 2004). Este estudo considerou apenas a incidência de primeiras descargas de retorno em função da menor relevância das descargas subsequentes na ocorrência de *backflashover* em linhas de classe de tensão a partir de 138 kV (Silveira et al., 2012).

O método do Efeito Disruptivo (DE) foi aplicado para as sobretensões resultantes de cada condição simulada com o intuito de calcular o valor da corrente crítica de primeiras descargas de retorno capazes de induzir o desligamento por *backflashover* (Darveniza and Vlastos, 1988; Hileman, 1999). A probabilidade de ocorrência de cada corrente crítica foi calculada utilizando distribuições de probabilidade cumulativas de corrente de pico. Por fim, derivado das probabilidades calculadas e considerando uma ampla faixa de resistividades do solo em baixa frequência (valores de 300 a 10.000  $\Omega$ .m), que são necessárias para se fazer uma análise de sensibilidade do impacto do efeito de dependência de frequência, foi determinado o desempenho da linha de 138-kV considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

Para tanto, foram consideradas três torres com dois vãos de 400 m de uma linha de 138-kV, com a descarga atmosférica atingindo o topo da torre central. Para evitar reflexões de ondas de tensão, as extremidades das linhas são perfeitamente casadas em toda a faixa de frequência utilizando linhas infinitamente longas. A silhueta da torre e as alturas dos cabos da linha (em metros) são ilustrados na Fig. 1 (valores de meio vão são apresentados entre parênteses). A linha de transmissão tem um condutor ACSR por fase, código LINNET e um cabo de blindagem EHS de 3/8". Um par de torres adjacentes (idênticas à da Fig. 1) é incluído nas simulações para considerar os efeitos de propagação das ondas de sobretensão nos condutores da linha, bem como as reflexões que ocorrem nos vãos adjacentes.

A Fig. 2 apresenta o arranjo de aterramento típico da linha considerada. Ele é composto por 4 cabos contrapeso, enterrados a 0,5 m de profundidade, de raio 7 mm e cada um partindo de um "pé" da base da torre.

O comprimento  $L$  dos cabos contrapeso é selecionado de acordo com o valor da resistividade do solo, considerando práticas comuns de concessionárias de energia brasileiras, conforme valores apresentados na Tabela 1 (ENERGISA, 2017).

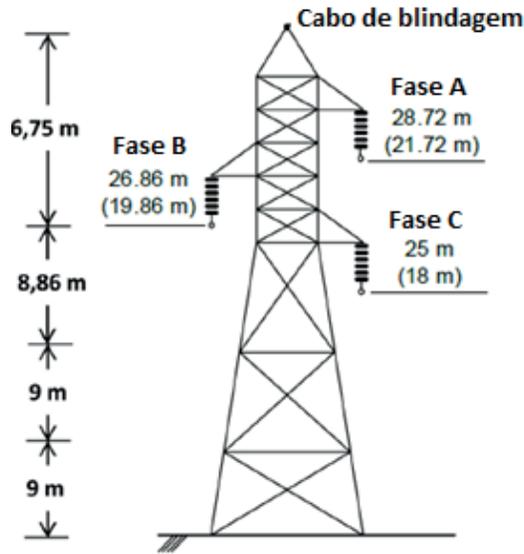


Fig. 1. Silhueta típica da torre sob análise (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

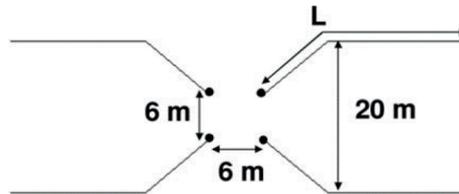


Fig. 2. Arranjo típico de aterramento de "pé" de torre (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

Resistividade do solo ( $\Omega\text{m}$ )	$L$ (m)
300	20
500	30
1.000	40
3.000	60
5.000	80
10.000	130

Tabela 1. Comprimento dos cabos contrapeso em função da resistividade do solo

As simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas no ATP. A vantagem de se usar este tipo de ferramenta está no seu baixo esforço computacional quando comparado a ferramentas que utilizam abordagem de campos eletromagnéticos, e ainda assim manter precisão adequada, principalmente quando se tratam de aplicações de

engenharia (Geri and Visacro, 2002).

Neste trabalho foram desprezados os efeitos associados ao processo de ionização do solo, pois este efeito é significativo apenas quando grandes valores de correntes de descargas são aplicadas em eletrodos curtos diferente do efeito da dependência da frequência que independe da amplitude da corrente e do comprimento dos eletrodos, e de acordo com as práticas usuais de proteção em linhas de transmissão, eletrodos longos são usados para atingir baixos valores de resistência de aterramento de “pé” de torre resultando em baixa densidade linear de corrente dispersa ao longo destes. (Visacro, 2007a).

Em seguida, a modelagem de cada componente da linha de transmissão é sucintamente descrita.

## 2.1 Forma de Onda da Corrente de Descarga Atmosférica

A representação adequada da forma de onda da corrente da descarga atmosférica é um fator crucial, entre outros, para realizar uma avaliação rigorosa da resposta dos sistemas de potência frente a descargas atmosféricas, considerando que a consistência física dos resultados da simulação é afetada pela representatividade das ondas das correntes de descarga aplicadas (De Conti and Visacro, 2007). Conforme demonstrado por registros de medição de torres instrumentadas, as primeiras descargas de retorno são caracterizadas por uma concavidade pronunciada na frente de onda e pela ocorrência de picos múltiplos. Normalmente, o segundo pico apresenta a maior amplitude de corrente, enquanto a inclinação máxima surge próximo ao primeiro pico (Visacro et al., 2004; De Conti and Visacro, 2007).

Considerando os aspectos anteriores, a onda de corrente que reproduz aproximadamente os principais parâmetros medianos de primeiras de retorno medidos na estação do Morro do Cachimbo – MG, são ilustradas na Fig. 3, e foram utilizadas nas simulações.

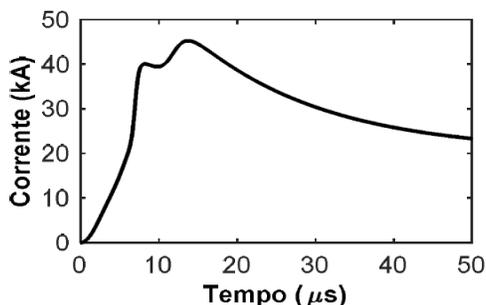


Fig. 3. Forma de onda da corrente representativa de primeiras descargas de retorno. Valores medianos de corrente de pico, tempo de frente e tempo de decaimento: , e . Adaptada de Conceição, Alípio and Dias (2018).

## 2.2 Torre da Linha de Transmissão

A torre é modelada como uma linha monofásica sem perdas. A impedância de surto desta linha é calculada utilizando as fórmulas de Jordan, que foram estendidas para modelar sistemas a multicondutores verticais (De Conti et al., 2006). Considerando que a torre pode ser representada por  $n$  condutores verticais que estão conectados ao mesmo ponto de injeção de corrente (topo da torre), é possível representar todo o sistema multicondutor como uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente dada por (De Conti et al., 2006):

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \dots + Z_{1n}}{n} \quad (1)$$

Em que

$$Z = 60 \left[ \ln \frac{4h}{r} - 1 \right] \quad (2)$$

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (3)$$

Em (2) e (3),  $h$  (m) é a altura do condutor,  $r$  (m) é o raio condutor, e  $d_{ij}$  (m) corresponde à distância entre os centros dos condutores  $i$  e  $j$ . Em particular, a torre da Fig. 1 foi dividida em quatro seções, cada uma representada por quatro condutores verticais. A parte inferior da torre foi representada como uma cascata de três linhas de transmissão (duas de 9 m e uma de 8,86 m de comprimento), enquanto a sua parte superior foi representada como uma única linha de transmissão de 6,75 m de comprimento. Isto foi feito para considerar a variação da seção transversal do torre com a altura, o que muda a impedância de surto mútua. A impedância de surto equivalente de cada segmento de torre foi calculada utilizando (1), (2) e (3), considerando as distâncias médias entre os condutores da torre e assumindo  $r=6,5$  cm. O modelo da torre é mostrado na Fig. 4.

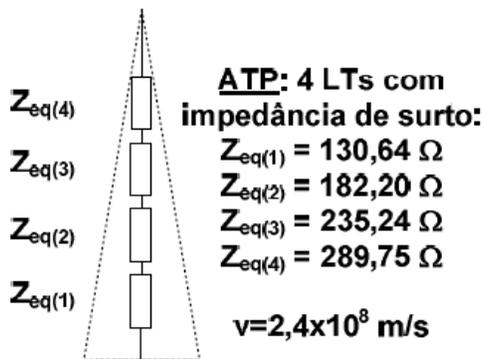


Fig. 4. Modelo da torre com os valores das impedâncias de surto por trecho (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

### 2.3 Condutores da Linha de Transmissão

Para modelagem dos condutores da linha de transmissão, foi utilizado o modelo desenvolvido por J. Marti (Marti, 1982), que está implementado no ATP. Nessa plataforma, o modelo JMarti da linha é implementado via rotina *Line and Cable Constants* (LCC) cuja entrada de dados corresponde, essencialmente, às posições geométricas dos condutores da linha e às características eletromagnéticas dos condutores envolvidos (aéreos e solo). Este modelo foi adotado nas simulações pois considera a variação dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência. Nas simulações, o ajuste desses parâmetros longitudinais foi considerado para a faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz, cobrindo todo o conteúdo de frequência das descargas incidentes. A matriz de transformação modal foi calculada nas frequências de 200 kHz e 1,2 MHz para primeiras descargas e descargas subsequentes, respectivamente (em virtude dos seus tempos de frente).

### 2.4 Sistema de Aterramento da Torre

A rigorosa modelagem do sistema de aterramento do “pé” da torre tem uma função essencial na consistência física do comportamento impulsivo deste sistema e na determinação das sobretensões desenvolvidas através das cadeias de isoladores das linhas de transmissão pela incidência de descargas atmosféricas no cabo de blindagem ou diretamente no topo da torre (Visacro, 2007a). Estas descargas possuem correntes associadas que são frequentemente definidas por um conteúdo de frequência de *dc* a Mega-hertz, em que o sistema de aterramento do “pé” da torre revela um comportamento diferente em diferentes faixas de frequência (IEEE, 1991).

Portanto, a adequada avaliação das sobretensões de origem atmosférica e consequentemente do desempenho de uma linha de transmissão não é possível a menos que o comportamento de banda larga da frequência da impedância do sistema de aterramento seja levado em conta de forma adequada (Alemi and Sheshyekani, 2015). Esta

não é, porém, uma tarefa simples, considerando que o procedimento de inclusão do modelo de banda larga dos sistemas de aterramento na determinação da resposta impulsiva não está bem estabelecido nos simuladores numéricos de transitórios eletromagnéticos, como o ATP.

Neste trabalho, os condutores de aterramento foram representados utilizando um modelo de linha de transmissão composto por uma indutância  $L$  em série, e uma condutância  $G$  e uma capacitância  $C$  em paralelo. Eles podem ser modelados como circuitos 'pi-equivalentes' conectados em série com elementos distribuídos R-L-C, onde cada circuito 'pi-equivalente' corresponde a um pequeno segmento do condutor de aterramento (Lorentzou et al., 2003), conforme ilustra a Fig. 5.

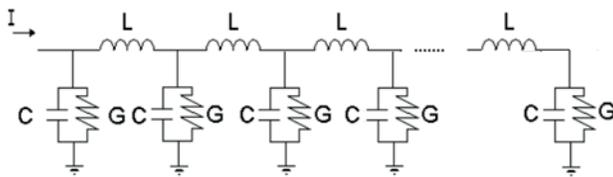


Fig. 4. Representação do condutor de aterramento. Adaptada de Lorentzou et al. (2003).

Foi feita uma adaptação do modelo original, na qual a resistência interna do cabo foi desprezada, pois esta era incluída como uma resistência de corrente contínua no ramo série da célula 'pi', o que não é fisicamente consistente em altas frequências. Vale ressaltar que mesmo a resistência interna em corrente alternada, considerando o efeito *skin*, é insignificante em relação à impedância de aterramento. Isto pode ser concluído, pois a resistência transversal do solo é infinitamente maior que a resistência interna do cabo, afinal a resistividade do solo é sempre extremamente maior que a do eletrodo de aterramento, supondo-se que este seja fabricado utilizando material condutor.

Os parâmetros R-L-C dos circuitos 'pi-equivalentes' são calculados usando (4), (5) e (6), baseado nas conhecidas expressões de Sunde (1968):

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left[ \log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right], (l \gg a, d \ll l) \quad (4)$$

$$C = \frac{\rho\epsilon}{R} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left[ \log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right] \quad (6)$$

onde  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) é a resistividade da terra,  $l$  ( $m$ ) é o comprimento do eletrodo,  $a$  ( $m$ ) é o raio do eletrodo,  $d$  (em  $m$ ) é a profundidade em que o cabo contrapeso está enterrado,  $\epsilon$  é a permissividade do solo ( $F/m$ ) e  $\mu$  ( $H/m$ ) é a permeabilidade do solo.

Para incluir o comportamento dependente da frequência da impedância do sistema de aterramento, a impedância harmônica  $Z(j\omega)$  do arranjo mostrado na Fig. 2 foi calculada num intervalo de frequências de 1 Hz a 10 MHz. Este parâmetro é útil para avaliar o desempenho de um sistema de aterramento independentemente das características da corrente da descarga atmosférica injetada e é definido como:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \quad (7)$$

Em que  $V(j\omega)$  e  $I(j\omega)$  são os fasores do potencial no ponto de injeção e a corrente injetada, respectivamente.

A impedância do sistema de aterramento da torre é calculada utilizando duas abordagens diferentes, ambas utilizando o modelo de banda larga, uma com parâmetros elétricos constantes no solo e outra considerando sua dependência da frequência, utilizando (8) e (9), com base num grande número de medições de campo, nas relações causais de Kramers-Kronig e nas equações de Maxwell (Alipio and Visacro, 2014b):

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left( \frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\gamma \quad (8)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right) \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 (1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{\gamma-1} \quad (9)$$

Em (8) e (9),  $\sigma_0$  é a condutividade do solo ( $mS/m$ ),  $\epsilon_r$  é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) ( $mS/m$ ),  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa,  $\epsilon_{r\infty}$  é a permissividade relativa em frequências mais altas,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo ( $\epsilon_0 \cong 8.854 \times 10^{-12}$  F/m) e  $f$  é a frequência em Hz. Os parâmetros  $\epsilon_{r\infty}=12$ ,  $\gamma=0,54$  e  $h(\sigma_0)$  em (10), são recomendados para obter resultados médios para a dependência de frequência dos parâmetros do solo (Alipio and Visacro, 2014b).

$$h(\sigma_0) = 1.26 \times \sigma_0^{0.73} \quad (10)$$

Vale ressaltar que a consistência física dessas expressões para determinar a dependência de frequência dos parâmetros do solo foi fornecida por resultados experimentais (Visacro and Alipio, 2012; Alipio and Visacro, 2014b).

O modelo racional que aproxima a resposta em frequência da impedância harmônica

$Z(j\omega)$  é obtido utilizando a técnica *Vector Fitting*, proposta por Gustavsen & Semlyen (1999). O algoritmo do *vector fitting* implementado no MATLAB® é de domínio público e está disponível *online* (Gustavsen, 2009). Essa rotina foi utilizada para ajustar a admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz em todos os casos deste trabalho. A partir do modelo racional, um circuito equivalente é sintetizado empregando a rotina *netgen.m* desenvolvida por Gustavsen (2009) e este circuito é exportado em um arquivo de texto que pode ser facilmente inserido no ATP.

## 2.5 Modelagem da Ruptura da Cadeia de Isoladores

O método do efeito disruptivo (método DE) é aplicado para determinar a ocorrência ou não de ruptura da cadeia de isoladores da linha. O conceito do método DE está baseado na ideia da existência de um efeito disruptivo crítico  $DE_c$  para cada configuração de isolador. Cada surto de tensão não padronizado possui um efeito disruptivo (DE) associado. Se esse valor DE exceder o valor crítico, há a ocorrência de uma descarga disruptiva, que provoca a ruptura do isolamento (Hileman, 1999). O efeito disruptivo associado a uma onda de tensão é determinado por:

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (11)$$

em que  $e(t)$  corresponde à onda de tensão aplicada sobre o isolador,  $V_0$  refere-se ao limiar de tensão a partir do qual tem início o processo de ruptura no isolador,  $t_0$  é o instante de tempo em que o valor instantâneo de  $e(t)$  ultrapassa  $V_0$ ,  $k$  é um fator adimensional, e DE é a variável denominada “efeito disruptivo”. Para uma linha de 138 kV típica, as constantes do método DE podem ser obtidas de acordo com Hileman (1999):  $DEC = 1,1506(CFO)^{1/k}$ ;  $k = 1,36$ ;  $V_0 = 0,77CFO = 500,5$  kV.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Sobretensões na Linha de Transmissão

As sobretensões desenvolvidas através da cadeia de isoladores superior (fase A) da linha de 138 kV devido a incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre são mostradas na Fig. 5. Decidiu-se por apresentar apenas os gráficos e valores correspondentes à fase A por se tratar da fase que apresentou os maiores valores de sobretensão em todos os casos estudados, sendo assim a mais relevante para o dimensionamento das proteções, além de proporcionar uma representação gráfica menos poluída.

As simulações assumiram a incidência da corrente da Fig. 3, a configuração da torre da Fig. 1 e o arranjo do sistema de aterramento da Fig. 2, e vãos de 400 m de comprimento, conforme descrito na Seção 2.

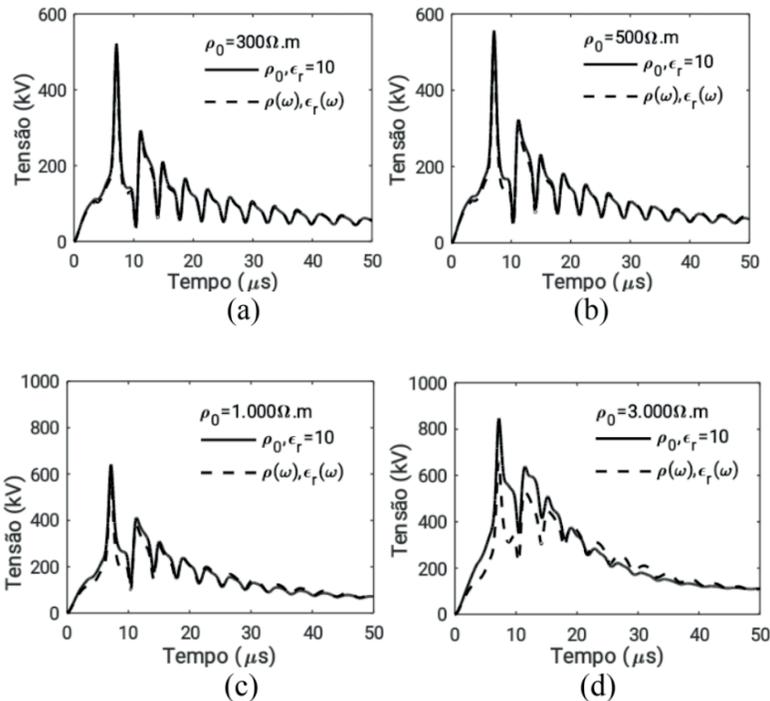
Os resultados mostram que a dependência da frequência dos parâmetros do solo não afeta significativamente a amplitude da sobretensão para solos de resistividade até

500  $\Omega.m$ , mas torna-se importante a partir deste valor. Isto é consistente com os resultados obtidos em outros trabalhos, que inclusive utilizam modelagens diversas (Visacro et al., 2012, Visacro and Silveira, 2015).

A Tabela 2 mostra claramente o impacto do efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre o pico das ondas de sobretensão da Fig. 5. Pode-se observar que a redução do pico de sobretensão ( $\Delta$ ) é significativa, sendo de aproximadamente 11% a 34% para  $\rho_0$  variando de 1.000 a 10.000  $\Omega.m$ .

### 3.2 Corrente Crítica

Para um determinado conjunto de condições da linha e forma de onda de corrente definida, é possível identificar facilmente a corrente crítica de pico que leva à ruptura da cadeia dos isoladores. Com a forma de onda da corrente mantida, basta incrementar seu valor até encontrar a corrente de pico correspondente à amplitude de sobretensão necessária para atingir a condição de ruptura. A Fig. 6 ilustra o procedimento para determinar a corrente crítica de pico de uma corrente representativa de primeira descarga.



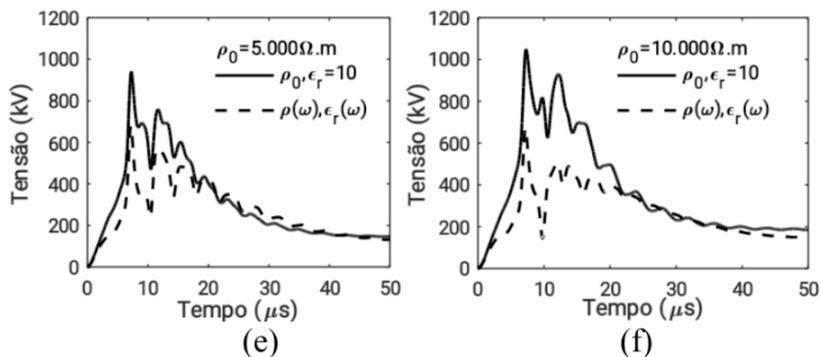


Fig. 5. Sobretensões simuladas considerando parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência.

**Sobretensões na Cadeia de Isoladores  
da Fase A (kV)**

$\rho_0$ ( $\Omega \cdot m$ )	$L$ (m)	$\rho = \rho_0,$ $\epsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega),$ $\epsilon_r(\omega)$	$\Delta(\%)$
300	20	522	501	-4,0%
500	30	556	522	-6,1%
1.000	40	641	572	-10,8%
3.000	60	846	660	-22,0%
5.000	80	942	682	-27,6%
10.000	130	1050	693	-34,0%

Tabela 2. Valores de pico das Sobretensões simuladas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

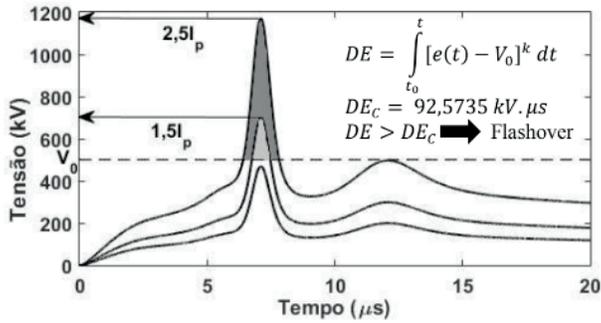


Fig. 6. Aplicação do método DE para avaliar a condição de *backflashover*.

Pode-se observá-la Fig. 5 (d), (e) e (f) que, para valores de resistividade do solo acima a partir de  $600 \Omega \cdot m$ , o efeito de dependência da frequência diminui não apenas tensão de pico, mas também os valores instantâneos de tensão ao longo de um intervalo após o pico e até a estabilização das duas curvas. Isto pode ser relevante para reduzir o valor resultante da integração ao utilizar o método DE para avaliar a condição de ocorrência de *backflashover*.

Para quantificar este efeito, o método DE foi aplicado às curvas de sobretensão obtidas através de cada condição de resistividade do solo para determinar o valor de pico da corrente crítica  $I_c$ , sob a hipótese de parâmetros de solo constantes e dependentes da frequência. O  $I_c$  corresponde a um limiar, ou seja, correntes superiores a ele levam os isoladores da linha à ruptura.

Os valores calculados de  $I_c$  estão indicados na Tabela 3, juntamente com a porcentagem de correntes de pico que excedem o valor crítico ( $I_p > I_c$ ), determinadas a partir da distribuição cumulativa de probabilidades das correntes de pico para primeiras descargas de retorno medidas na estação do Morro do Cachimbo - MG (Visacro et al., 2004), e que é aproximadamente  $P_l = 1/[1 + (I/45,3)^{3,9}]$ . Ao se considerar o efeito da dependência dos parâmetros do solo com a frequência as correntes críticas são aumentadas em todos os casos, e este aumento se torna mais significativo com o aumento resistividade do solo. Assim, o percentual de correntes de pico superiores ao  $I_c$  (eventos que levam a linha à ruptura de isolamento) é diminuído, conforme indicado pelo  $\Delta$ . O impacto do efeito é significativo mesmo em solos de baixa resistividade, partindo de aproximadamente 18% para solos de  $300 \Omega \cdot m$  e alcançando 66% para solos de  $10.000 \Omega \cdot m$ .

Amplitude e Probabilidade de Ocorrência das Correntes de Descarga Críticas						
$\rho_0$ ( $\Omega \cdot m$ )	$L$ (m)	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$		$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$		$\Delta(\%)$
		$I_C$ (kA)	$I_p > I_C$ (%)	$I_C$ (kA)	$I_p > I_C$ (%)	
300	20	113	2,8%	119	2,3%	-17,6%
500	30	103	3,9%	111	2,9%	-24,0%
1.000	40	81	9,4%	92	5,9%	-36,2%
3.000	60	51	38,7%	65	19,7%	-49,6%
5.000	80	43	55,1%	59	26,3%	-53,5%
10.000	130	36	71,0%	57	29,0%	-66,0%

Tabela 3. Amplitude das Correntes Crítica calculadas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

### 3.3 Taxa de desligamento por backflashover

A avaliação do impacto do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo sobre a taxa de desligamento da linha de transmissão por *backflashover* foi desenvolvida seguindo um procedimento semelhante ao indicado por Anderson (1982). A metodologia proposta requer certas definições/informações preliminares a serem aplicadas, quais sejam a densidade de descargas atmosféricas ( $N_g$ ) ao longo da linha a ser estudada, a geometria de suas torres e um conjunto de valores de resistividade do solo a ser analisada, cobrindo uma distribuição de valores encontrados ao longo do percurso que a linha atravessa.

Foi utilizado  $N_g = 10$  por se tratar de um valor médio encontrado no estado de Minas Gerais (NBR 5419, 2015), onde também está localizada a estação do Morro do Cachimbo. Além deste, outro parâmetro importante é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano ( $N_s$ ), que é definido pela seguinte expressão (IEEE, 1997):

$$N_s = N_g \times \left( \frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad (12)$$

em que  $h$  (m) é a altura da torre e  $b$  (m) é a distância entre os cabos de blindagem da torre. A divisão por “10” ocorre para converter de unidades, pois é medido em descargas/km<sup>2</sup>/ano e  $h$  e  $b$  em metros.

No cálculo da taxa de *backflashover* somente as descargas atmosféricas que incidem diretamente na torre são consideradas. De maneira empírica, assume-se que 60 % das descargas que atingem uma linha de transmissão incidem diretamente nas torres

(GRANT, ANDERSON, HILEMAN, 1985; ANDERSON, CLAYTON, ELAHIT et al., 1993). Desta forma, o número de descargas que atingem a torre de uma linha ( $N_T$ ) é fornecido por (13):

$$N_T = 0,6 \times (N_S) \quad (13)$$

em que  $N_S$  é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano.

Pode-se, enfim, calcular a taxa de *backflashover* ( $N_{BF}$ ). Em (14) é definido o cálculo de  $N_{BF}$  (número de desligamentos por *backflashover* por 100 km de linha por ano), representada a seguir:

$$N_{BF} = \frac{N_T}{100} \times P[I \geq I_c] \quad (14)$$

em que  $N_T$  é o número de descargas que atingem a torre e  $P[I \geq I_c]$  é a probabilidade de uma corrente de descarga atmosférica ser superior a mínima corrente de descarga suficiente para que ocorra o desligamento da linha de transmissão. A divisão por “100” em (14) é para transformar o valor das probabilidades ( $P[I \geq I_c]$ ) de porcentagem para p.u.

Com base nas probabilidades de ocorrência de correntes críticas da Tabela 4, foram calculadas as taxas de *backflashover* esperadas sob a hipótese de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência.

A análise considera nove diferentes distribuições de resistividade do solo ao longo da linha: seis distribuições uniformes ( $\rho_o$  a partir de 300 a 10.000  $\Omega.m$ ) e três distribuições não-uniformes, estas representam condições diferentes de solo ao longo da linha, sendo assim mais realistas. Destas três, uma prevê apenas solos de resistividade baixa a moderada (sem incluir amostras acima de 1.000  $\Omega.m$ ), outra prevê solos de resistividade moderada (amostras de todos os valores de resistividade incluídos, com maior frequência os solos com resistividade de 500 e 1.000  $\Omega.m$ ), e a última prevê solos de resistividade alta a extremamente alta (sem amostras abaixo de 3.000  $\Omega.m$ ).

Considerando as distribuições uniformes, os resultados da Tabela 4 mostram que a dependência de frequência provoca uma forte diminuição das taxas de desligamento por *backflashover* da linha em todos os casos, partindo de 20% até aproximadamente 60%.

As taxas de desligamento estimadas (por 100 km por ano) sob a hipótese de parâmetros de solo constantes variam de 1 a 26, o que demonstra o crescimento acentuado conforme a resistividade do solo é aumentada.

Esta redução também é significativa para as distribuições não-uniformes. Considerando as taxas de desligamento de 2,1; 7,6 e 19,5 (para as condições de resistividade do solo de baixa a moderada, moderada, e alta a extremamente alta) são

reduzidas em 28,6%, 50%, e 54,4%, respectivamente, devido ao efeito da dependência da frequência.

A Tabela 4 sumariza os resultados relatados anteriormente e indica a redução nas taxas de desligamento ( $\Delta$ ) esperadas.

Hipóteses de distribuição de $\rho_0$ ao longo da linha						$N_{BF}$ (Desligamentos/100 km/ano)		
300 ( $\Omega \cdot m$ )	500 ( $\Omega \cdot m$ )	1.000 ( $\Omega \cdot m$ )	3.000 ( $\Omega \cdot m$ )	5.000 ( $\Omega \cdot m$ )	10.000 ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho = \rho_0,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
100%	0%	0%	0%	0%	0%	1	0,8	-20,0%
0%	100%	0%	0%	0%	0%	1,4	1,1	-21,4%
0%	0%	100%	0%	0%	0%	3,4	2,2	-35,3%
0%	0%	0%	100%	0%	0%	14,1	7,2	-48,9%
0%	0%	0%	0%	100%	0%	20,2	9,6	-52,5%
0%	0%	0%	0%	0%	100%	26	10,6	-59,2%
30%	30%	40%	0%	0%	0%	2,1	1,5	-28,6%
10%	30%	30%	10%	10%	10%	7,6	3,8	-50,0%
0%	0%	0%	40%	30%	30%	19,5	8,9	-54,4%

Tabela 4. Taxas de desligamento por *backflashover* esperadas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência e diversas distribuições de resistividade de solo ao longo da linha.

Dos resultados apresentados, fica claro que a dependência da frequência dos parâmetros do solo pode afetar muito significativamente as taxas de desligamentos das linhas de transmissão, causando uma melhoria significativa do seu desempenho frente a descargas atmosféricas em todos os casos estudados.

## 4 | CONCLUSÕES

Foi avaliada e discutida a influência do efeito dependente da frequência da resistividade e da permissividade do solo no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Os resultados apresentados implicam numa redução significativa das sobretensões de origem atmosférica da linha testada devido à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

A dependência da frequência dos parâmetros do solo causa uma relevante redução nas sobretensões associadas às primeiras descargas de retorno para linhas instaladas em solos acima de 500  $\Omega \cdot m$ . Isso resulta em um aumento significativo dos valores de pico das correntes críticas, levando a uma consequente redução das probabilidade de desligamento por *backflashover*.

Foi constatado que a dependência da frequência dos parâmetros do solo afeta muito significativamente a taxa de desligamento da linha estudada para toda a faixa de resistividades do solo estudada. À medida que a resistividade é aumentada, o impacto se torna mais pronunciado. Considerando as distribuições não-uniformes, e mais realistas,

de solo indicadas na Tabela 4, foram encontradas reduções das taxas de desligamento esperadas de cerca de 28% a 54,4%.

Os resultados apresentados demonstram uma melhoria significativa do desempenho da linha testada frente a descargas atmosféricas devido à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, e atribuem uma certa generalidade ao impacto deste efeito nas linhas de transmissão.

A partir destas conclusões, faz-se clara a importância de se incluir do efeito dependente da frequência da resistividade e permissividade do solo nas avaliações de desempenho frente a descargas atmosféricas das linhas de transmissão que atravessam regiões que apresentem resistividade do solo superior a 500  $\Omega$ .m.

## REFERÊNCIAS

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.

Alemi, M. R. and Sheshyekani, K. (2015). **Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines.** *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 6, pp. 1627-1636.

Alipio, R. and Visacro, S. (2013). **Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes.** *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139.

Alipio, R. and Visacro, S. (2014a). **Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil.** *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171.

Alipio, R and Visacro, S. (2014b). **Impulse Efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters,** *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723.

Alipio, R., Duarte, M. H. R. and Lima, A. C. S. (2018). **Influence of grounding representation on the lightning performance of line surge arresters – Part I: Impact on the developed overvoltages.** *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE).*

Anderson, J. G. (1982). **Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition, chapter 12.** Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Anderson, J. G., Clayton, R., Elahit, H. et al. (1993). **Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models,** *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). **NBR 5419-2 Proteção Contra Descargas Atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de Risco.** Rio de Janeiro.

Chisholm, W. A., Chow, Y. L. and Srivastava, K. D. (1983). **Lightning surge response of transmission towers.** *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242.

- Conceição, D., Alipio, R. and Dias, R. N. (2018). **Lightning performance of wind turbine grounding systems considering typical brazilian soil conditions**. *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*.
- Darveniza, M. and Vlastos, A. (1988). **The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standardwave shapes—A theoretical basis**. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 23, no. 3, pp. 373–381.
- De Conti, A, Visacro, S, Soares, A. and Schroeder M. A. O. (2006). **Revision, extension and validation of Jordan’s formula to calculate the surge impedance of vertical conductors**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, n. 3, pp. 530–536.
- De Conti, A. and Visacro, S. (2007). **Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 49, no. 2, pp. 448-451.
- ENERGISA (2017). NTU 004 - **CRITÉRIOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO**.
- Geri, A. and Visacro, S.F. (2002). **Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model**. *Proc. of 26th ICLP*, Krakow, Poland.
- Grant, I. S, Anderson, J.G. and Hileman, A.R. (1985), **A Simplified Method For Estimating Lightning Performance of Transmission Lines**, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932.
- Grcev, L. (2009). **Impulse efficiency of ground electrodes**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 42, no. 24, pp. 441–451.
- Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). **Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, pp. 1052–1061.
- Gustavsen, B. **Matrix Fitting Toolbox** [Online]. Available: <https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/>, 2009.
- Hileman, A. (1999). **Insulation Coordination for Power Systems**. *CRC Press*, pp. 627–640.
- IEEE (1991). **IEEE Std. 142 - Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book)**.
- IEEE (1997). **IEEE Std. 1243 Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines**.
- Lorentzou, M. I., Hatzargyriou, N. D., and Papadias, B. C. (2003). **Time domain analysis of grounding electrodes impulse response**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 517–524.
- Marti, J. R. (1982). **Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation**. *IEEE Trans. Power App. And Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157.
- Prikler, L. and Hoidalén, H.K. (2009). **ATPDraw Manual, Version 5.6**.

- Silveira, F. H., De Conti, A. and Visacro, S. (2010). **Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 929-935.
- Silveira, F. H., Visacro, S., De Conti, A. and Mesquita, C. (2012). **Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 2, pp. 316-322.
- Sunde, E. D. (1968). *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. 2nd ed. New York: Dover.
- Visacro, S., Soares, A., Schroeder, M.A.O., Cherchiglia, L.C.L. and Sousa, V.J. (2004). **Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station**, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, pp. 1-11.
- Visacro, S. (2007a). **A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381-386.
- Visacro, S. (2007b). **Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines**. *J. Light. Res.*, vol. 1, pp. 60-68.
- Visacro, S., Alipio, R., Murta 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. and De Conti, A. (2012). **The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 1, pp. 205-213.
- Visacro, S., Silveira, F. H., Xavier, S. and Ferreira, H. B. (2012). **Frequency dependence of soil parameters: The influence on the lightning performance of transmission lines**. *Proc of 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, 2012, pp. 1-4.
- Visacro, S., Silveira, F. H. (2015). **The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 57, no. 3, pp. 434-441.

## 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](http://www.atenaeditora.com.br)

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)