

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

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

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

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

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-133-3

DOI 10.22533/at.ed.333211706

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

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

Joelson Lopes da Paixão
Mauro Fonseca Rodrigues
José Oizimas Junior

DOI 10.22533/at.ed.3332117061

CAPÍTULO 2..... 15

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117062

CAPÍTULO 3..... 29

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117063

CAPÍTULO 4..... 41

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117064

CAPÍTULO 5..... 55

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

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117065

CAPÍTULO 6..... 69

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117066

CAPÍTULO 7..... 82

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

Carollina Silva de Santana
Armando Hirohumi Tanimoto

DOI 10.22533/at.ed.3332117067

CAPÍTULO 8..... 91

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117068

CAPÍTULO 9..... 109

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

Lucas Luiz Lunarti
Maury Meirelles Gouvêa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117069

CAPÍTULO 10..... 117

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

Vinicius Pedroza Delsin
Antonio Newton Licciardi Junior

DOI 10.22533/at.ed.33321170610

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

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

Data de aceite: 01/06/2021

Jaimis Sajid León Colqui

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

Sérgio Kurokawa

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

Anderson Ricardo Justo de Araújo

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

José Pissolato Filho

School of Electrical and Computer Engineering
State University of Campinas (UNICAMP)
Campinas, SP, Brasil

ABSTRACT: Numerical spurious oscillations are present in transient responses when overhead transmission lines (TL) are represented by the lumped parameter models (LPM) which can be composed of π , T or L branches in cascade. These spurious oscillations present erroneous peaks which can lead to incorrect interpretations in the protection devices and overestimation in the insulation level of equipment, such as insulation strings, pre-insertion resistor, circuit breakers. In the literature, modified π -circuit topologies are proposed with damping resistances inserted to reduce the magnitude of these spurious oscillations. However, the effects of the damping

resistances in the T and L -circuit topologies are unknown. In this article, a transient analysis of each modified topology is carried out for different damping resistances. Simulations obtained with the modified T and L topologies are compared with those obtained with numerical inverse Laplace transform and with traditional LPM (without damping resistances). Results shown that a significant reduction of spurious oscillations are seen when the modified topologies are employed for the transient responses. In this way, the modified topologies can be an alternative to represent symmetrical and ideally transposed overhead three-phase TL and can be applied to study the electromagnetic transients in power systems.

KEYWORDS: Electromagnetic transients; transmission line; lumped parameter models; time domain, modified topologies.

ANÁLISE TRANSITÓRIA DOS MODELOS CLÁSSICOS E MODIFICADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARÂMETROS CONCENTRADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

RESUMO: As oscilações espúrias estão presentes nas respostas transitórias quando linhas de transmissão (LT) são representadas pelo modelo a parâmetros concentrados (MPC). O MPC é composto por circuitos π , T ou L conectados em cascata. Essas oscilações são caracterizadas por picos errôneos que podem levar às interpretações incorretas nos sistemas de proteção. Da literatura, são propostas topologias de circuitos π modificadas pela inserção de resistências de amortecimento que reduzem as

oscilações espúrias. Entretanto, nas topologias T e L , esses efeitos são desconhecidos. Neste artigo, uma análise das respostas transitórias de cada topologia é realizada para diferentes valores da resistência de amortecimento. Os resultados obtidos com as topologias T e L são comparadas com os obtidos pelo método da transformada numérica inversa de Laplace e pelo MPC clássico. Verifica-se uma redução expressiva das oscilações espúrias nas respostas transitórias quando as topologias modificadas são empregadas. Desse modo, essas topologias são modelos alternativos para representação de LT trifásicas simétricas e idealmente transpostas e podem ser aplicadas para estudar os transitórios eletromagnéticos.

PALAVRAS-CHAVE: Transitórios eletromagnético; linha de transmissão; modelos a parâmetros concentrados; domínio do tempo, topologias modificadas.

1 | INTRODUCTION

Several models are proposed to represent overhead transmission lines (TL) in the literature which they are developed in the frequency or time domain, presenting their own advantages and characteristic limitations. The TL models developed in the frequency domain are limited when non-linear loads are inserted in the TL or in the studies of faults in the electrical power systems. Additionally, transient responses are calculated by inverse Laplace or Fourier transforms implemented via numerical methods, which due to the complexity of this conversion, a high computational time and cost may be required [1]. Thus, TL models developed directly in the time domain are preferred in transient electromagnetic studies in power systems.

In this context, the lumped parameter transmission line models (LPM) has been used extensively in the literature to represent short overhead TL [2]–[4]. The LPM considers that a generic overhead TL can be represented by longitudinal and transversal branches of circuits in the form π , T or L connected in cascade, as further detailed. In these LPM, the currents and voltages along a certain overhead TL are represented by a system of state equations whose solutions are obtained by numerical integration methods [3]. The LPM allows the insertion of non-linear loads, such as rectifiers and surge arresters, the study of faults at any point of the line and the inclusion of the Corona effect in the electromagnetic simulations [4], [5]. However, numerical spurious oscillations resulting from the numerical methods employed to calculate the currents and voltages associated with lumped representation occur in the transient responses.

These oscillations are provoked due to the fact that the distributed electrical parameters are represented by lumped parameters in cascade. Such spurious oscillations are characterized by high-amplitude erroneous peaks that distort transient responses. These oscillations do not adequately represent the transient responses and can cause incorrect analyzes in the time domain, affect the operations of the protection equipment and oversize the electrical supportability in the chain of insulators, pre-insertion resistors and lightning arrestors. In order to mitigate oscillations some methods are proposed in the literature, such as: (i) the use of digital and analog filters [6], [7]; (ii) by adjusting the numerical methods

of integration [8] and (iii) by representing TL through a cascade of circuits π with modified lumped topologies [6], [9]. This last alternative inserts a damping resistor in parallel to the longitudinal branch or a damping resistor in series to the branch transverse to the classical π circuit in cascade. However, other topologies such as T and L , have not been studied with the insertion of the damping resistances in their structures in the literature.

In this article, the performance of two modified LPM topologies formed by the cascaded T and L circuits with damping resistances is investigated. These two topologies are employed to represent a symmetrical and ideally transposed overhead three-phase TL submitted to a energization maneuver and to mitigate spurious oscillations in the transient responses directly in time domain using modal decomposition technique. These transient responses are compared with those results obtained with distributed parameter model calculated by the numerical inverse Laplace transform and with those obtained with the classical LPM (without damping resistances). Results show a significant reduction in spurious oscillations in transient responses when modified topologies are employed to represent the three-phase TL. The proposed topologies are shown as effective alternative models to represent symmetrical and ideally transposed three-phase TL which can be applied to study the electromagnetic transients for this type of disturbance.

2 | LUMPED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL

In this section, the classical LPM and the modified π , T , and L circuits in cascade are presented. The LPM represents a TL whose electrical parameters are distributed along its length, per-unit-length (p.u.l.), by lumped parameters connected in the branches of π , T , or L in cascade, as illustrated in Figs. 1, 2 and 3, respectively.

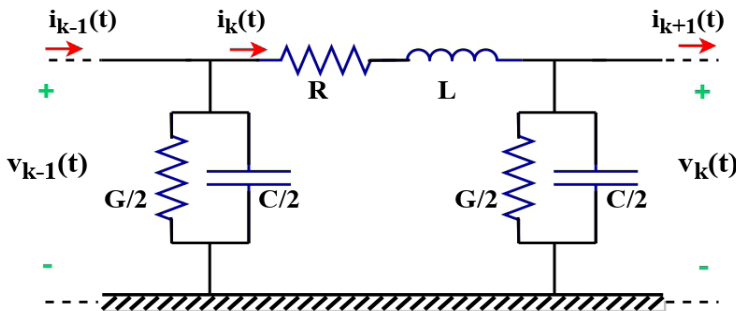


Figure 1: Unit of the classical π -circuit.

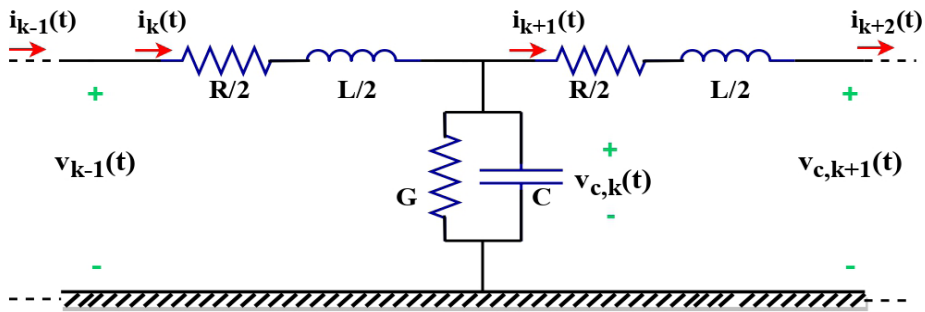


Figure 2: Unit of the classical T-circuit.

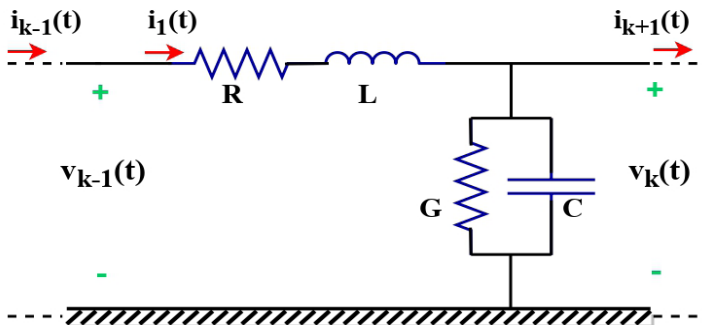


Figure 3: Unit of the classical L-circuit.

Each unit of lumped circuit is modeled by resistance R , inductance L , capacitance C and conductance G . These lumped parameters R , L , C and G are related to its respective distributed parameters, as follows [9]

$$R = R' \frac{d}{n}, \quad L = L' \frac{d}{n}, \quad C = C' \frac{d}{n}, \quad G = G' \frac{d}{n}, \quad (1)$$

where d is the line length and n is the number of cascaded lumped circuits. The terms R' , L' , C' and G' are the p.u.l. resistance, inductance, capacitance and conductance. Each circuit cascade unit has two state variables: transversal voltage $v_k(t)$ and longitudinal current $i_k(t)$. To assess all voltages and currents along the line length, it is necessary to employ a system of state equations, represented generically as follows [3]

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

$$y = Cx + Du. \quad (3)$$

In (2) and (3), x is the state variable vector for the continuous-time system, u is the input vector, y is the output vector, the state matrices A , B , C , D are matrices whose coefficients are related to lumped parameters and the matrix order depends on the number n . The solution of the state space equations is obtained by numerical integration methods such as Heun's method [3].

2.1 Classical LPM with π -circuits

Considering a overhead represented by the classical LPM with a cascaded π -circuits, each unit can be described as shown in Fig.1, where the currents and voltages at the both ends are shown. Applying Kirchoff's laws to the generic π -circuit in Fig.1, the longitudinal current i_k and the transverse voltage v_k data are obtained as follows

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{k-1} - \frac{1}{L} v_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} - \frac{G}{C} v_k. \quad (5)$$

The matrices \mathbf{A} and \mathbf{B} and the state vector \mathbf{x} are given by

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = [i_1 \quad \cdots \quad i_n \quad v_1 \quad \cdots \quad v_n]^T, \quad (8)$$

where the sub-matrices \mathbf{A}_{11} , \mathbf{A}_{12} , \mathbf{A}_{21} e \mathbf{A}_{22} are written as follows

$$\mathbf{A}_{11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -\frac{1}{C} \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{2}{C} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_{22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (12)$$

2.2 Classical LPM with T -circuits

When an overhead TL is represented by classical LPM with cascade T -circuits, as shown in Fig. 2, applying Kirchoff's laws, the longitudinal currents and transversal voltages are given by

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{c,k-1} - \frac{1}{L} v_{c,k} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v_{c,k}}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} - \frac{G}{C} v_{c,k}. \quad (14)$$

The matrices \mathbf{A}_T , \mathbf{B}_T and \mathbf{x}_T written as state variables for this topology is given by

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{T11} & \mathbf{A}_{T12} \\ \mathbf{A}_{T21} & \mathbf{A}_{T22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} \frac{2}{L} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_T = [i_1 \quad \cdots \quad i_{n+1} \quad v_{c,1} \quad \cdots \quad v_{c,n}]^T, \quad (17)$$

where the matrices \mathbf{A}_{T11} , \mathbf{A}_{T12} , \mathbf{A}_{T21} e \mathbf{A}_{T22} are written as follows

$$\mathbf{A}_{T11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{T12} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \ddots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & -\frac{1}{L} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{2}{L} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{A}_{T21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{A}_{T22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (21)$$

2.3 Classical LPM with L -circuit

When a overhead TL is represented by classical cascaded T -circuits, as shown in Fig. 2, the state currents and voltages are given by

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{k-1} - \frac{1}{L} v_k \quad (22)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} - \frac{G}{C} v_k, \quad (23)$$

where the matrices \mathbf{A}_L , \mathbf{B}_L and \mathbf{x}_L are written as follows

$$\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{L11} & \mathbf{A}_{L12} \\ \mathbf{A}_{L21} & \mathbf{A}_{L22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{B}_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

$$\mathbf{x}_L = [i_1 \quad \dots \quad i_n \quad v_1 \quad \dots \quad v_n]^T, \quad (26)$$

and the sub-matrices are

$$\mathbf{A}_{L11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (27)$$

$$\mathbf{A}_{L12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{A}_{L21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{A}_{L22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (30)$$

2.4 LPM with damping resistance

In order to mitigate numerical oscillations, a modified π -circuit is proposed in the literature [6], [10]. In this topology, a damping resistance R_D is connected parallel to the longitudinal branch RL in the classical LPM. In this topology, the damping resistance R_D is given by [6]

$$R_D = K_d \frac{2L}{\Delta t}; \quad G_D = \frac{1}{R_D}, \quad (31)$$

where K_d is an adjustable factor that varies between 2 and 10 [6], [9]. The variable L is the longitudinal lumped inductance of the circuit and Δt is the step size employed in the simulations. This topology was employed to mitigate numerical oscillations and it consists of a simple method in the classical LPM. However, this damping resistance can be inserted in the modified topologies T and L , according to the following development.

2.5 Representation of the modified cascaded T -circuit

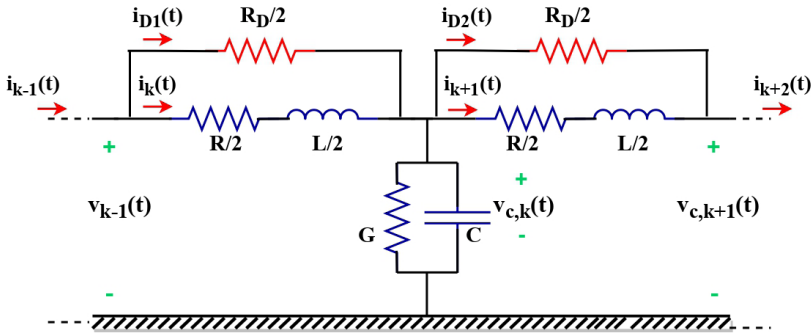


Figure 4: Unit of the modified cascaded T -circuit with parallel damping resistance R_D .

The modified cascaded T -circuit topology is proposed in order to reduce the spurious oscillations that occur in this type of topology, following the same idea as the modified π -circuit topology. For this, a damping resistance R_D is added in parallel to the longitudinal branch RL of the classical LPM T -circuit topology as shown in Fig. 4. Applying the Kirchhoff's laws in the modified cascade T -circuit topology, the state equations are written as follows

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = \frac{-R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{c,k-1} - \frac{1}{L} v_{c,k} \quad (32)$$

$$\frac{\partial v_{c,k}}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} + \beta' v_{c,k-1} - \alpha' v_{c,k} + \beta' v_{c,k+1}. \quad (33)$$

The variables α' and β' in (4) are defined as follows

$$\alpha' = \frac{(G+2G_D)}{c}; \quad \beta' = \frac{G_D}{c}. \quad (34)$$

Inserting the (4) in a state equation form, the state matrices are given by

$$\mathbf{A}'_T = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_{T11} & \mathbf{A}'_{T12} \\ \mathbf{A}'_{T21} & \mathbf{A}'_{T22} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{B}'_T = [2/L \ 0 \ \dots \ 2/G_D \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (36)$$

$$\mathbf{x}'_T = [i_1 \ \dots \ i_{n+1} \ v_1 \ \dots \ v_n]^T, \quad (37)$$

where the sub-matrices \mathbf{A}'_{T11} , \mathbf{A}'_{T22} , \mathbf{A}'_{T21} and \mathbf{A}'_{T12} are written as follows

$$\mathbf{A}'_{T11} = \mathbf{A}_{T11} \quad (38)$$

$$\mathbf{A}'_{T12} = \mathbf{A}_{T12} \quad (39)$$

$$\mathbf{A}'_{T21} = \mathbf{A}_{T21} \quad (40)$$

$$\mathbf{A}'_{T22} = \begin{bmatrix} -\alpha' & \beta' & \dots & 0 \\ \beta' & -\alpha' & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \beta' \\ 0 & \dots & \beta' & -\alpha' \end{bmatrix} \quad (41)$$

2.6 Representation of the modified cascaded L -circuit

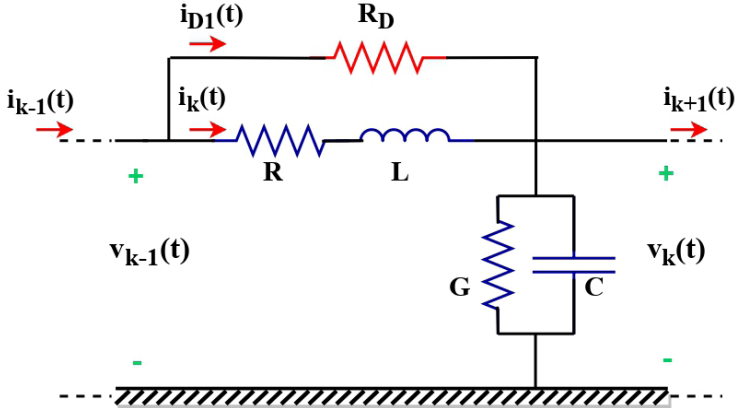


Figure 5: Unit of the modified cascaded L -circuit with parallel damping resistance R_D .

The second topology proposed to reduce spurious oscillations in the transient responses of the topology by L , is the modified L -circuit. This topology is represented by a damping resistance R_D added parallel to the longitudinal branch RL of the classical LPM L as can be seen in Fig. 5. The equations resulting from the analysis of the modified L -circuit are written as

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = \frac{-R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{k-1} - \frac{1}{L} v_k \quad (42)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} + \beta' v_{k-1} - \alpha' v_k + \beta' v_{k+1}. \quad (43)$$

The variable α' and β' are computed as (34). The state equations for the modified cascaded L -circuit are given by

$$\mathbf{A}'_L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_{L11} & \mathbf{A}'_{L12} \\ \mathbf{A}'_{L21} & \mathbf{A}'_{L22} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\mathbf{B}'_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 & \beta' & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (45)$$

$$\mathbf{x}'_L = [i_1 \quad \dots \quad i_n \quad v_1 \quad \dots \quad v_n]^T. \quad (46)$$

The sub-matrices \mathbf{A}'_{L11} , \mathbf{A}'_{L12} , \mathbf{A}'_{L21} and \mathbf{A}'_{L22} are defined as follows

$$\mathbf{A}'_{L11} = \mathbf{A}_{L11} \quad (47)$$

$$\mathbf{A}'_{L12} = \mathbf{A}_{L12} \quad (48)$$

$$\mathbf{A}'_{L21} = \mathbf{A}_{L21} \quad (49)$$

$$\mathbf{A}'_{L22} = \begin{bmatrix} -\alpha' & \beta' & \dots & 0 \\ \beta' & -\alpha' & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \beta' \\ 0 & \dots & \beta' & -\frac{G+G_D}{c} \end{bmatrix}. \quad (50)$$

3 I MODIFIED LPM APPLIED IN THREE-PHASE LINES

The transient responses in a three-phase TL with a vertical symmetry plane and ideally transposed can be performed using the line decomposition. This line decomposition is carried out by Clarke's transformation matrix where this modal transformation matrix is composed by real and constant elements. For vertical symmetry plane and ideally transposed transmission line, the decomposed line is decoupled into its propagation modes where each mode is represented by three independent single-phase lines. The Clarke's matrix is given by [11]

$$\mathbf{T}_{\text{Clarke}} = \begin{bmatrix} 2/\sqrt{6} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (51)$$

The three-phase TL with a vertical symmetry plane and ideally transposed is represented by matrices of longitudinal impedances and transversal admittances which are given by

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (52)$$

where the components of the main diagonal are (Z_p) and outside the main diagonal are (Z_m). The elements of the transverse admittance matrix \mathbf{Y} have the same layout as the elements of the \mathbf{Z} longitudinal impedance matrix. When the TL is ideally transposed, Clarke's transformation matrix decouples the overhead line into its exact modes [11]. The equations that are used to decompose the ideally transposed three-phase TL into its propagation modes are expressed as

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^T \mathbf{Z} \mathbf{T}_{\text{Clarke}} \quad (53)$$

$$\mathbf{Y}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^{-T} \quad (54)$$

Inserting (52) in (53) and in (54), it yields in the following matrices

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} Y_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Y_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Y_0 \end{bmatrix}. \quad (55)$$

In this technique, the modal transformation matrices separates an ideally transposed three-phase LT into three independent single-phase lines, so-called propagation modes, denominated in this work as: α , β and 0. A representation of the phase-domain to modal domain conversions are illustrated in Fig. 6.

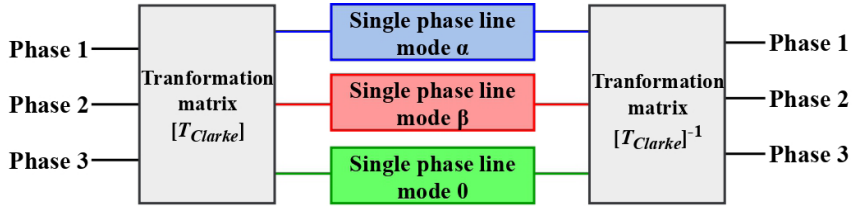


Figure 6: Representation of the modal decoupling in the three single-phase TL.

4 I VALIDATION OF THE MODIFIED TOPOLOGY

The performance of the modified topologies to calculate the transient responses in an ideally transposed three-phase TL is performed in this section. The Th used has a length of 50 km whose geometric configuration is shown in Fig. 7 and the internal (r_{int}) and external (r_{ext}) and the TL resistance (R_{dc}) are shown in Table 1.

Phase conductors	r_{int} [cm]	r_{ext} [cm]	R_{dc} [Ω /km]	NB
1, 2 and 3	0	1.53	0.03842	4

Table 1: Parameters of the phase-conductors.

In this table, the *NB* is the number of the conductors in the bundle. The three-phase TL is located on a resistivity soil ρ_e of 1,000 Ω .m based on the geometric data of the TL, the resistance matrices (\mathbf{R}'), inductance (\mathbf{L}') and capacitance (\mathbf{C}'), computed at the frequency f of 60 Hz, considering the ground-return impedance, computed by the Carson's approach, and the skin effect at this frequency. These matrices are given by

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 0.0691 & 0.0587 & 0.0587 \\ 0.0587 & 0.0691 & 0.0587 \\ 0.0587 & 0.0587 & 0.0691 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (56)$$

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} 1.9217 & 1.1454 & 1.1454 \\ 1.1454 & 1.9217 & 1.1454 \\ 1.1454 & 1.1454 & 1.9217 \end{bmatrix} mH/km \quad (57)$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 12.9116 & -2.2111 & -2.2111 \\ -2.2111 & 12.9116 & -2.2111 \\ -2.2111 & -2.2111 & 12.9116 \end{bmatrix} nF/km \quad (58)$$

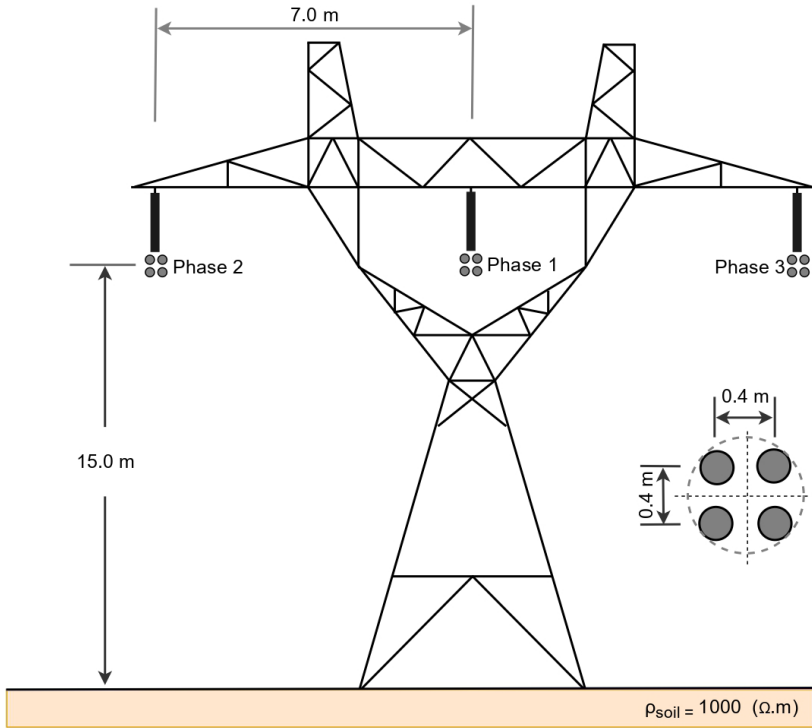


Figure 7: Three-phase line with vertical symmetry and ideally transposed.

The p.u. longitudinal matrix and transversal admittance matrix are given by

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}' + j\omega\mathbf{L}' \quad (59)$$

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{C}' \quad (60)$$

where $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency, in rad/s. The three-phase TL is decomposed using the Clarke's matrix and Eqs. (eq:3.3) and (54). Each propagation mode is represented by the classical LPM and the modified LPM in cascaded π , T and L -circuits with damping resistors. Once the transient responses are obtained for each independent mode, they are converted to the phase domain. In order to analyze the transient responses of the three-phase TL at the receiving end $V_m(t)$, the case illustrated in Fig. 8 is considered. The number of circuits employed in the modified T or L is 1 circuit/km and the time step $\Delta t = 0.5 \mu s$ is used in the simulations. In this case, the TL has at the sending end (k) a DC voltage source of $V(t)$ of 1 p.u. connected in phase 1, whereas the other phases are connected to ground. At $t = 0$, the TL is energized (switching maneuver) by this condition. At the receiving end (m), a three-phase resistive load of 2 k Ω per phase is considered and the voltages $V_m(t)$ are obtained. In the simulations of this work, the electrical parameters of the TL were considered constant due to the energization with a DC source (step voltage) that contains a low-frequency content. The ground-return impedance is calculated using the classical

Carson's approach.

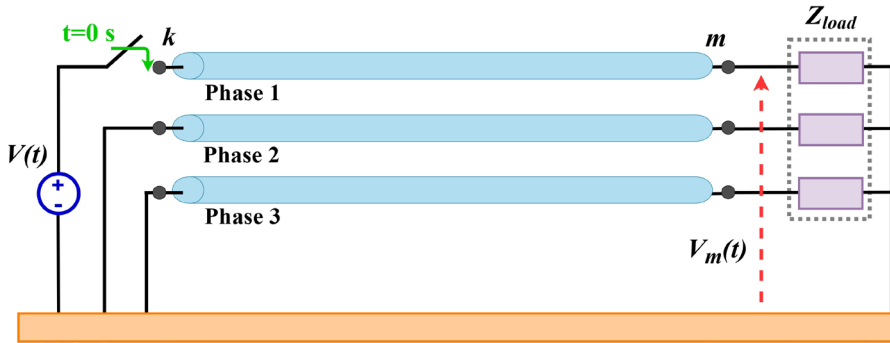


Figure 8: Three-phase TL energized by a DC voltage and three-phase balanced load at the receiving end.

The transient responses $V_m(t)$ are calculated using the classical LPM and the modified LPM for the topologies T and L -circuits. Several adjustment factors K_q are investigated in order to obtain the most significant reduction in spurious oscillations, as shown in Table 2, chosen from the most significant reductions in spurious oscillations in each α , β and 0 mode. The responses are compared with those obtained by the distributed parameter model that uses the numerical inverse Laplace transform (NLT) technique [12] considered the reference for the transient responses in this work.

	T-circuit			L-circuit		
	α	β	0	α	β	0
$K_{\alpha 1}$	10.0	10.0	8.00	10.0	10.0	8.00
$K_{\alpha 2}$	1.01	1.01	0.82	0.95	0.95	0.78
$K_{\alpha 3}$	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.08

Table 2: Values of K_q to the modified T and L-circuits employed in the simulations.

In Figs. 9 and 11 the transient voltages $V_m(t)$ of phase 1 are shown using the circuits T and L , respectively. The transient tensions $V_m(t)$ in phases 2 and 3 are shown Figs. 10 and 12 which they are identical due to the symmetry of the TL, using the T and L -circuits. The propagation time t_v is given by

$$t_v = d/v, \quad (61)$$

where d is the line length and v is the speed of the traveling waves. Adopting that $v \approx c$ (speed of light $c = 3e5$ km/s) and a line length d of 50 km, the $t_v \approx 0.165$ ms.

When the three-phase TL is energized at $t = 0$, traveling waves propagate along the

TL causing the surge voltage to rise at various points in the circuit. At the receiving end, after a propagation time t_v , the transient voltages at each phases is generated by the sum of the incident and reflected waves, which the amplitudes depend on the load impedance connected at receiving end, and on the inductive and capacitive couplings between overhead phase-conductors conductors. Thus, the induced voltages in phases 2 and 3 are produced during the switching maneuver of the TL. It can be noted from these figures that when there is a positive variation in the voltage of the phase 1 (Figs. 9 and 11), the induced voltages, in opposite polarity, are generated in adjacent phases 2 and 3 (Figs. 10 and 12), according to the Faraday's law of induction. In the steady state, the voltage in phase 1 will reach 1 p.u. the same value of the DC voltage applied by the source at the sending end, whereas the voltages in phases 2 and 3 will be zero.

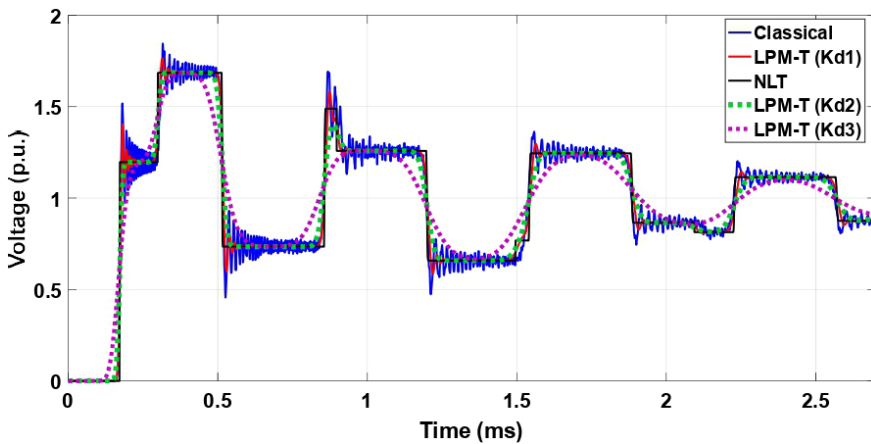


Figure 9: Voltage $V_m(t)$ at the phase 1 computed by NLT, classical LPM and modified cascaded T -circuits.

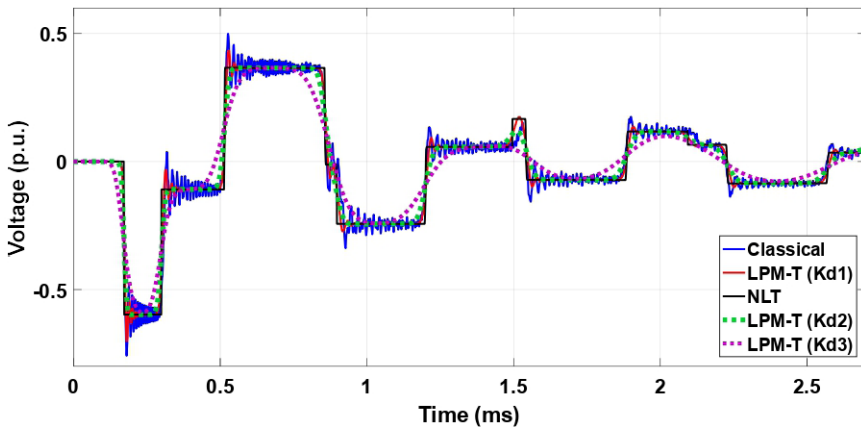


Figure 10: Voltages $V_m(t)$ at the phases 2 and 3 computed by NLT, LMP and modified cascaded T -circuits.

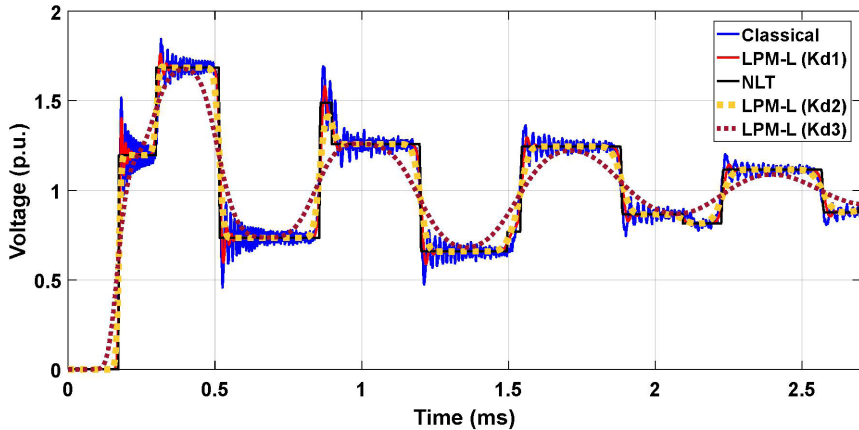


Figure 11: Voltage $V_m(t)$ at the phase 1 computed by NLT, classical LPM and modified cascaded L -circuits.

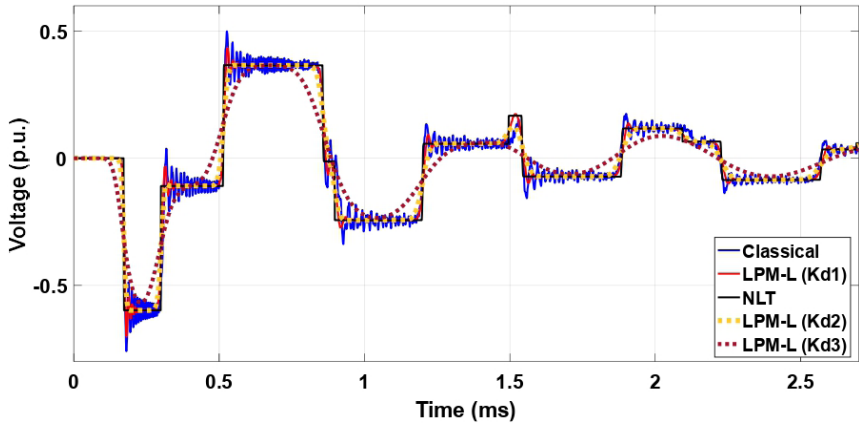


Figure 12: Voltages $V_m(t)$ at the phases 2 and 3 computed by NLT, LMP and modified cascaded L -circuits.

As shown in Figs. 9 to 12, it can be noted that the classical models have higher spurious oscillations which significantly distortion in the transient voltages in comparison with those responses obtained by the NLT. The proposed modified topologies, denominated by LPM- T and LPM- L for the modified cascaded T and L -circuit topology, respectively, show a significant reduction in spurious oscillations in all transient responses. This reduction is more pronounced for the lower adjustment factor K_d . However, high distortion is observed when a certain value of K_d is used in the simulations, for example, if the rise time in the modified LPM with the modified T -topology is less than the propagation time $t_v = 0.33$ ms, which occurs correctly in the classical LPM and NLT. These distortions in the rise time can lead to erroneous interpretations in the relay acquisition systems for protection against line faults using the traveling wave method [13]. Regarding numerical spurious oscillations, if these erroneous peaks are taken as a reference, the electrical insulation of the equipment

can be overestimated and also it may affect the coordination of the insulation of an electrical system.

In order to measure the magnitude of these erroneous peaks, the transient responses obtained by the modified classical LPM, NLT and LPM with the modified T and L -circuit models are shown in Figs. 13 and 14 in detail. In this case, the voltages obtained for LPM modified $T - k_{d2}$ and LPM modified $L - k_{d2}$ present the higher reductions with the lower distortion in transient responses. The peak values of the transient voltages obtained in the phases 1 and 2, as well as the errors (E) in % obtained in relation to those computed with the NLT technique are shown in Table 3. As seen from this table, the voltage peaks obtained by the classical LPM present higher deviations in comparison with obtained for the modified topologies. The highest error occurs for the voltage peaks computed for the phases 2 and 3. However, the modified topologies T and L present an excellent precision in comparison with the transient responses with the NLT technique.

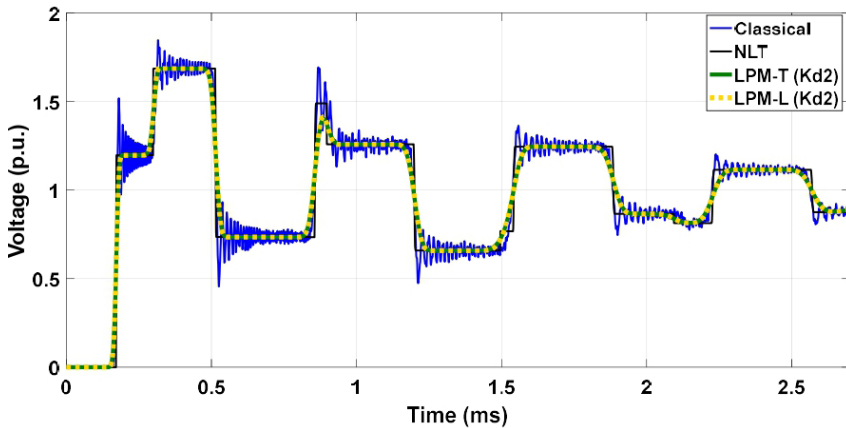


Figure 13: Voltage $V_m(t)$ for phase 1 employing modified cascaded T and L -circuits with k_{d2} .

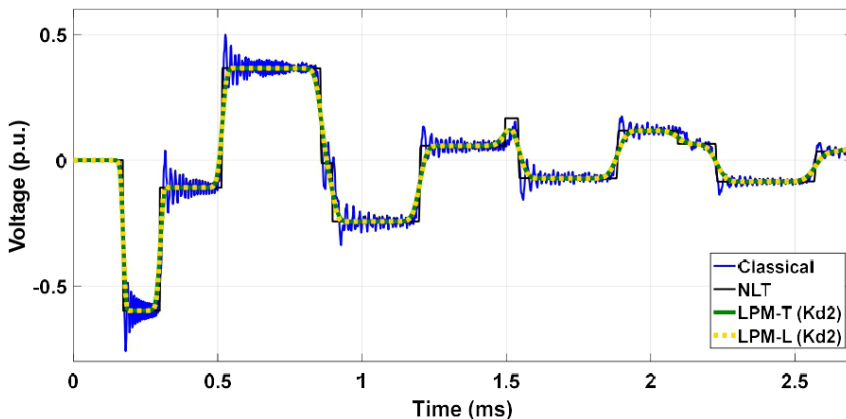


Figure 14: Voltages $V_m(t)$ for the phases 2 and 3, employing cascaded modified T and L -circuits with k_{d2} .

Model	Phase	E(%)	Phase	E (%)
NLT	1.707	-	-0.59	-
LPM	1.925	12.78	-0.74	20.27
LPM-T	1.709	0.12	-0.59	0.10
LPM-	1.710	0.18	-0.59	0.13

* computed at = 0.471 ms; ** computed at = 0.366 ms

Table 3: Transient voltages (p.u.) and error E(%) for the LPM models.

The main advantage of the modified LPM model is the direct application to represent three-phase TL and the direct reduction of numerical spurious oscillations without the need for analog or digital filters, or the frequency-domain transmission line representation that requires the use frequency-to-time domain conversion methods such as the Laplace or Fourier transforms.

5 | CONCLUSIONS

This article has presented the state space equations for the currents and voltages for the LPM with the classical cascaded π , T and L -circuits, and the modified cascaded T and L -circuits to represent overhead TL. These classical and modified topologies were employed to calculate the transient responses in a three-phase overhead TL submitted to an energization maneuver directly in time domain. The modified topologies with the cascaded circuits with a parallel damping resistor R_D has shown a good performance in the reduction of the numerical spurious oscillations in all the transient responses. In the modified topologies with cascaded T and L , the variation of the adjustment factor K_d has provided a significant mitigation of numerical spurious oscillations. Results have shown a significant attenuation between the classical LPM topologies, the NLT (reference model) and the modified LPM topologies employing the best K_d in all the simulations. In these time-domain transient responses, there is an excellent reduction in the peaks of transient voltages computed at the receiving end combining the lowest distortion in the rise time of the transient responses. Based on these results, the proposed modified topologies are efficient and can be used as models in the representation of a symmetrical and ideally transposed three-phase transmission lines, without frequency-domain transmission line modeling and the application of frequency-to-time domain methods required for the Laplace or Fourier transforms.

FUNDING

This study was financed by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Finance Code 001), by the São Paulo Research Foundation (grant: 2019/01396-1) and by the Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento

REFERENCES

- [1] N. F. De Jesus, C. P. da Costa, L. D. P. Fernández, and J. B. Castellero, “Estudo comparativo de três algoritmos de inversão numérica da transformada de Laplace,” *Rev. Bras. Comput. Apl.*, vol. 9, no. 1, p. 63, 2017.
- [2] L. M. Popović, *Practical Methods for Analysis and Design of HV Installation Grounding Systems*. Elsevier Inc., 2018.
- [3] J. A. R. Macías, A. G. Expósito, and A. B. Soler, “A Comparison of Techniques for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 894–903, 2005.
- [4] M. S. Mamiş, “Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 2, p. 200, 2003.
- [5] M. S. Mamiş and M. E. Meral, “State-space modeling and analysis of fault arcs,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 1–3, pp. 46–51, 2005.
- [6] A. I. Chrysochos, G. P. Tsolaridis, T. A. Papadopoulos, and G. K. Papagiannis, “Damping of Oscillations Related to Lumped-Parameter Transmission Line Modeling,” *Int. Conf. Power Syst. Transients*, 2015.
- [7] A. R. J. De Araújo, S. Kurokawa, A. A. Shinoda, and E. C. M. Da Costa, “Mitigation of erroneous oscillations in electromagnetic transient simulations using analogue filter theory,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 41–48, 2016.
- [8] J. C. G. De Siqueira, B. D. Bonatto, J. R. Martí, J. A. Hollman, and H. W. Dommel, “A discussion about optimum time step size and maximum simulation time in EMTP-based programs,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 24–32, Mar. 2015.
- [9] J. S. L. Colqui, A. R. J. De Araújo, and S. Kurokawa, “Improving the performance of a lumped transmission line model used in electromagnetic transient analysis,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 21, pp. 4942–4951, 2019.
- [10] CIGRE, “The calculation of switching surges. III Transmission line representation for energisation studies with complex feeding networks,” 1979.
- [11] M. C. Tavares, J. Pissolato, and C. M. Portela, “New mode domain multiphase transmission line model-Clarke transformation evaluation,” in *POWERCON 1998 - 1998 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, 1998, vol. 2, pp. 860–864.

[12] P. Gómez and F. A. Uribe, "The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 116–123, 2009.

[13] P. M. Silveira, R. Seara, and H. H. Zurn, "Localização de faltas por ondas viajantes—uma nova abordagem baseada em decomposição wavelet," 2001.

ÍNDICE REMISSIVO

A

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

B

Balanceamento de carga nas fases 29
Biocombustível 173, 178

C

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

D

DRA 159, 160, 161, 163, 165

E

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

F

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

G

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

H

Hardware-in-the-loop 69, 72

M

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

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

Método de soma de correntes 15, 19

Método PLL 1

Micro-ondas 159, 160, 162, 165

Modelo de Hammerstein 145, 149

O

Óleo vegetal 173

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

Otimização por enxame de partículas 41

P

PID-IMC 132, 133, 139

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

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

R

Recursos públicos 56

Redes de petri hierárquicas temporizadas 29

S

Simulações de sincronismo 1

Sincronização de geração distribuída 1

Sistema de localização indoor 145

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

Sistemas de distribuição de energia elétrica 15

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

Smart grids 29, 69, 81

Sohxlet 173

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

T

Termografia 167, 169, 172

Termovisor 167





Transformadas de Clarke e Park 1, 3

Trilateração 145, 147, 148, 149, 154

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2




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

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

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

 **Atena**
Editora
Ano 2021