

# 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 Cremona

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](http://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**



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

## 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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 26/04/2021

### Hugo Andrés Ruiz Flórez

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira – PR  
<http://lattes.cnpq.br/1231733785708599>

### Cristiane Lionço Zeferino

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0915594224998333>

### Leandro Antonio Pasa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira – PR  
<http://lattes.cnpq.br/4095187669845473>

### Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Faculdade de Ensino Superior de São Miguel  
do Iguaçu  
São Miguel do Iguaçu – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8402032745107959>

### Eduarda Abatti Dahlem

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Medianeira – PR  
<http://lattes.cnpq.br/9448912058710598>

**RESUMO:** A análise do fluxo de potência é uma ferramenta indispensável na determinação das condições operativas em regime permanente de um Sistema de Energia Elétrica. Convencionalmente, o problema de fluxo de potência tem sido resolvido de maneira satisfatória através do método de Newton-

Raphson. No entanto, alguns autores afirmam que pelo fato deste método ter sido desenvolvido com base nas características típicas dos Sistemas de Transmissão de Energia, pode apresentar problemas de convergência quando aplicado em certos Sistemas de Distribuição de Energia. Por esta razão, têm sido desenvolvidos alguns métodos de fluxo de potência que contemplam exclusivamente as particularidades dos Sistemas de Distribuição de Energia, sendo o método de Soma de Correntes o mais referenciado. Neste trabalho, com o intuito de verificar a aplicabilidade do método de Newton-Raphson como solução do problema de fluxo de potência em Sistemas de Distribuição de Energia balanceados é realizada uma análise comparativa entre os métodos de Newton-Raphson e o método de Soma de Correntes. Para tal fim, são determinados os pontos de operação de três sistemas-teste sob a influência de vários cenários: a) diferentes níveis de carregamento. b) inserção de geração distribuída e c) variação na relação  $X/R$  das Linhas de Transmissão. Os resultados obtidos mostram que o método de Newton-Raphson pode ser usado para resolver o problema de fluxo de potência em Sistemas de Distribuição de Energia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluxo de Potência, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Método de Newton-Raphson, Método de Soma de Correntes.

# A COMPATATIVE STUDY BETWEEN NEWTON-RAPHSON AND CURRENT SUMMATION METHOD FOR LOAD FLOW IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

**ABSTRACT:** The load flow analysis is an essential tool to evaluate the steady-state operating conditions of an Electric Power System. Conventionally, the load flow problem has been successfully solved using the Newton-Raphson method. However, whereas this method has been developed for Electric Transmission Systems, some studies suggest that the Newton-Raphson method can present convergence problems when applied to Electric Distribution Systems. For this reason, several load flow approaches have been proposed exclusively for Electric Distribution Systems, among which stand out the Current Summation method. In this work, in order to verify the applicability of the Newton-Raphson method to obtain the load flow solution for balanced distribution systems, a comparative study between Newton-Raphson method and Current summation method is performed. For this purpose, the power system operation point of three test system is analyzed under the influence of various scenarios: a) different loading levels. b) insertion of distributed generation and c) variation of  $X/R$  ratio of Transmission Lines. The results obtained show that the Newton-Raphson method can be used to successfully solve the load flow problem in Electrical Distribution Systems.

**KEYWORDS:** Power System Load Flow, Electrical Power Distribution System, Newton-Raphson Method, Current Summation Method.

## 1 | INTRODUÇÃO

Devido à crescente expansão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), a sua operação e monitoramento tornam-se cada vez mais complexos, sendo necessário realizar diferentes interligações elétricas e o desenvolvimento de novas e melhores técnicas de análise computacional. Dada sua complexidade, os SEP podem ser divididos em três grandes áreas: Sistema de Geração de Energia Elétrica (SGEE), Sistema de Transmissão de Energia Elétrica (STEE) e Sistemas de Distribuição de Energia (SDEE). Nestas áreas existem diferentes abordagens caracterizadas pela sua complexidade matemática, tais como: despacho econômico, localização de faltas, fluxo de potência, estimação de estado, previsões de demanda, entre outros (SAADAT, 1999; GRAINGER, 1994).

Para que um SEP opere da melhor maneira possível, dentro dos limites operacionais requeridos, melhores ferramentas de planejamento e operação são requeridas no desenvolvimento de sua instalação e expansão. Nestes casos, os estudos de fluxo de potência são de enorme importância na determinação das condições de operação em regime permanente de um SEP (MONTICELLI, 1983). Os resultados desses estudos são obtidos a partir da resolução de um conjunto de equações algébricas não-lineares e servem como ponto de partida para a execução de outras análises (MONTICELLI, 1999; GOMEZ-EXPÓSITO, 2009).

Tradicionalmente, o método de Newton-Raphson e suas versões desacopladas têm sido empregados satisfatoriamente na resolução do problema do fluxo de potência. Estes



métodos, que foram desenvolvidos considerando principalmente as características típicas dos STEE, caracterizam-se por usar uma formulação matricial e um procedimento iterativo de rápida convergência, motivo pelo qual são amplamente divulgados nas análises de SEP (MONTICELLI, 1983).

Segundo o anterior, é possível usar o método de Newton-Raphson para realizar estudos de fluxo de potência em SDEE (WASLEY, 1974; ZHANG, 1997). No entanto, alguns autores não recomendam usar este método, já que, os SDEE possuem características diferenciadas, tais como, topologia radial ou fracamente malhadas, operação multifísica e desequilibrada, cargas desbalanceadas e dispersas e presença de geração distribuída (GD), entre outras (CESPEDES, 1990; SHIRMOHAMMADI, 1995). Adicionalmente, estudos apontam que a relação típica  $X/R$  dos SDEE pode causar problemas de convergência ao usar os métodos de Newton-Raphson para realizar análises de fluxo de potência em SDEE (SHIRMOHAMMADI, 1988; CHIANG, 1991; MURUGANANTHAM, 2016).

De acordo com o anterior e considerando algumas limitações computacionais da época, no início dos 90 vários métodos de fluxo de potência foram propostos exclusivamente para SDEE, denominados métodos de varredura (SHIRMOHAMMADI, 1988; BARAN, 1989; CESPEDES, 1990; GOSWANI, 1992). Esses métodos apresentam um desempenho eficiente, pois, não usam formulações matriciais de grande porte e não precisam de inversão de matrizes para atualização das variáveis de estado, o que representa uma vantagem computacional quando comparados com o método de Newton-Raphson.

Dentre os métodos de varredura propostos destaca-se o método de Soma de Correntes (SHIRMOHAMMADI, 1995). Este método tem a vantagem de usar um procedimento simples para determinar o ponto de operação de um SDEE, onde as variáveis de estado são atualizadas iterativamente através de varreduras desde as barras extremas até a subestação e vice-versa. Além disso, pela fácil implementação computacional e simplicidade, o método de Soma de Correntes é um dos métodos mais usados na resolução de problemas em SDEE (BARAN, 1995; BARAN, 1997; CIRIC, 2003; FRANCO, 2013).

Em suma, embora o método de Newton-Raphson seja o procedimento mais empregado nos estudos de fluxo de potência em STEE existem algumas dúvidas sobre a sua aplicabilidade nos SDEE. Portanto, neste trabalho é proposto realizar uma análise do desempenho do método de Newton-Raphson quando aplicado em SDEE balanceados. Para avaliar o comportamento do método de Newton-Raphson são realizadas algumas alterações nos sistemas-teste IEEE 13, 37 e 69 barras, de tal forma que, possa ser analisado o desempenho do método diante dos diferentes cenários de operação propostos. Estes cenários compreendem diferentes níveis de carregamento, a inserção de GD e o impacto da relação  $X/R$  nas linhas de transmissão (LT). Por fim, os resultados obtidos pelo método de Newton-Raphson são validados através de uma análise comparativa com o método de Soma de Correntes. Desta forma, a partir dos resultados obtidos neste artigo determina-se a aplicabilidade do método de Newton-Raphson na solução do problema de

fluxo de potência em SDEE.

## 2 I FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS MÉTODOS DE NEWTON-RAPHSON E SOMA DE CORRENTES

O equacionamento dos métodos de Newton-Raphson e de Soma de Correntes usados nas análises de fluxo de potência são mostrados a seguir.

### 2.1 Método de newton-raphson

Na formulação básica do método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983; GRAINGER, 1994), cada barra do SEP pode ser correlacionada a quatro variáveis: magnitude de tensão ( $V_k$ ), ângulo de tensão ( $\theta_k$ ), potência ativa líquida ( $P_k = P_k^G - P_k^D$ ) e de potência reativa líquida ( $Q_k = Q_k^G - Q_k^D$ ). Dentre estas grandezas, dependendo do tipo de barra, algumas são inseridas no problema como incógnitas e outras como dados de entrada, como mostrado a seguir:

- Barra de referência ( $V\theta$ ): Nesta barra  $V_k$ ,  $\theta_k$ ,  $P_k^D$  e  $Q_k^D$  devem ser especificadas, enquanto que,  $P_k^G$  e  $Q_k^G$  são incógnitas.
- Barra de carga ( $PQ$ ): Nesta barra não há geração ( $P_k^G = Q_k^G = 0$ ), as potência  $P_k^D$  e  $Q_k^D$  devem ser especificadas, enquanto que,  $V_k$  e  $\theta_k$  são incógnitas.
- Barra controlada por tensão ( $PV$ ): Nesta barra  $P_k^G$ ,  $P_k^D$ ,  $Q_k^D$  e  $V_k$  devem ser especificadas, enquanto que,  $Q_k^G$  e  $\theta_k$  são incógnitas.

Desta forma, a partir da entrada dos dados das LT e das barras do SEP, na iteração são calculadas as potências ativas nas barras PQ e PV e as potências reativas nas barras PQ, conforme equações (1) e (2):

$$P_k^{(v)} = V_k^{(v)2} G_{kk} + V_k^{(v)} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m^{(v)} (G_{km} \cos \theta_{km}^{(v)} + B_{km} \sin \theta_{km}^{(v)}) \quad (1)$$

$$Q_k^{(v)} = -V_k^{(v)2} B_{kk} + V_k^{(v)} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m^{(v)} (G_{km} \sin \theta_{km}^{(v)} - B_{km} \cos \theta_{km}^{(v)}) \quad (2)$$

Em seguida, calculam-se através os resíduos das potências através das equações (3) e (4):

$$\Delta P_k^{(v)} = P_k^{esp} - P_k^{(v)} \quad (3)$$

$$\Delta Q_k^{(v)} = Q_k^{esp} - Q_k^{(v)} \quad (4)$$

Se o maior valor dos resíduos calculados em (3) e (4) estiver abaixo da tolerância

adotada, o processo iterativo atingiu a convergência para a solução  $(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)})$ . Caso contrário, o processo iterativo segue com a determinação da matriz Jacobiana do sistema, e posteriormente, a resolução do sistema de equações representado pela equação (5):

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_k^{(v)} \\ \Delta V_k^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) & N(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) \\ M(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) & L(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_k^{(v)} \\ \Delta Q_k^{(v)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde os elementos das matrizes  $H$ ,  $N$ ,  $M$  e  $L$  contêm as derivadas parciais das equações  $P_k$  e  $Q_k$  em função das variáveis  $V_k$  e  $\theta_k$ . Finalmente, através da equação (6) são atualizados os valores de  $(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)})$ .

$$\begin{bmatrix} \theta_k^{(v+1)} \\ V_k^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_k^{(v)} \\ V_k^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta_k^{(v)} \\ \Delta V_k^{(v)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

O processo iterativo continua até satisfazer a condição de convergência.

## 2.2 Método de soma de correntes

O método de Soma de Correntes caracteriza-se pelo uso de um equacionamento diferente ao usado pelo método de Newton-Raphson onde as variáveis de estado do sistema são atualizadas iterativamente através de varreduras desde as barras extremas até a subestação e vice-versa. Geralmente, estas varreduras são chamadas de varredura reversa (à montante) e varredura direta (à jusante), respectivamente. Esses caminhos à montante e à jusante são traçados após realizar um ordenamento em camadas do SDEE.

De forma similar ao método de Newton-Raphson, neste método são definidos quatro variáveis para cada tipo de barra:  $V_{kr}$ ,  $V_{ki}$ ,  $I_{kr}$  e  $I_{ki}$ . No entanto, há uma série de diferenças significativas em relação ao método de Newton-Raphson, pois, para determinar o ponto de operação deve ser possível calcular  $I_{kr}$  e  $I_{ki}$  em todas as barras do SDEE. Por esta razão, faz-se necessário implementar um procedimento chamado de método de compensação de reativos que possibilita a representação das barras PV nas análises de fluxo de potência (SHIRMOHAMMADI, 1995).

A formulação do método de Soma de Correntes é obtida a partir do cálculo das injeções de correntes nas barras do SEP, conforme a equação (7):

$$I_k^{(v)} = \left( \frac{S_k}{V_k^{(v)}} \right)^* - Y_k^{sh} V_k^{(v)} \quad (7)$$

Após simplificar a expressão anterior e separando a parte real da parte imaginária, obtêm-se as equações (8) e (9):

$$I_{kr}^{(v)} = \frac{P_k V_{kr}^{(v)} + Q_k V_{ki}^{(v)}}{\left( V_{kr}^{(v)} \right)^2 + \left( V_{ki}^{(v)} \right)^2} + Y_k^{sh} V_{ki}^{(v)} \quad (8)$$

$$I_{ki}^{(v)} = \frac{P_k V_{ki}^{(v)} - Q_k V_{kr}^{(v)}}{\left(V_{kr}^{(v)}\right)^2 + \left(V_{ki}^{(v)}\right)^2} - Y_k^{sh} V_{kr}^{(v)} \quad (9)$$

A partir de (8) e (9) e usando a varredura reversa podem ser calculadas as correntes  $J_{mk_r}^{(v)}$  e  $J_{mk_i}^{(v)}$ ,  $\forall mk \in \Omega L$ , tal como mostrado a seguir nas equações (10) e (11):

$$J_{mk_r}^{(v)} = -I_{kr}^{(v)} + \sum_{kl \in \Omega L} J_{kl_r}^{(v)} \quad (10)$$

$$J_{mk_i}^{(v)} = -I_{ki}^{(v)} + \sum_{kl \in \Omega L} J_{kl_i}^{(v)} \quad (11)$$

Em seguida, realizando a varredura direta são calculadas as tensões nas barras através das equações (12) e (13):

$$V_{kr}^{(v)} = V_{mr}^{(v)} - r_{mk} J_{mk_r}^{(v)} + x_{mk} J_{mk_i}^{(v)} \quad (12)$$

$$V_{ki}^{(v)} = V_{mi}^{(v)} - r_{mk} J_{mk_i}^{(v)} - x_{mk} J_{mk_r}^{(v)} \quad (13)$$

A partir destas equações, calcula-se em cada iteração os erros entre as potências calculadas e as potências especificadas, tal como segue nas equações (14) e (15):

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{(v)} \quad (14)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{(v)} \quad (15)$$

Onde  $P_k^{(v)}$  e  $Q_k^{(v)}$  podem ser calculados a partir da equação (16):

$$S_k^{(v)} = \left(V_{kr}^{(v)} + jV_{ki}^{(v)}\right) \left(I_{kr}^{(v)} + jI_{ki}^{(v)}\right)^* - Y_k^{sh} |V_k| ^2 \quad (16)$$

O processo iterativo continua até satisfazer a condição de convergência.

### 3 I CENÁRIOS DE OPERAÇÃO PROPOSTOS

Três cenários de operação foram estabelecidos para cada um dos sistemas-teste com o intuito de comparar os resultados dos métodos de Newton-Raphson e Soma de Correntes sob a influência de diferentes níveis de carregamento, inserção de GDs e a variação da relação  $X / R$  nas LT. Os principais aspectos destes cenários são descritos a seguir:

- Níveis de carregamento: As faixas de variação das tensões consideradas baseiam-se nos valores de tensão em regime permanente estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021), para a faixa de tensão superior a 1 kV e inferior a 69 kV, conforme a Tabela 1:

Carga	Faixa de variação de tensão
Leve	$\geq 0,93$
Média	$\geq 0,90$ e $< 0,93$
Pesada	$< 0,90$

Tabela 1. Faixas de variação de tensão para cada tipo de carga

Os diferentes níveis de carregamento foram determinados a partir da multiplicação das cargas dos sistemas-teste por uma constante de carga  $k$ . Os valores para as constantes são elucidadas na Tabela 2.

Carga	Sistema-teste		
	SDEE 13 barras	SDEE 37 barras	SDEE 69 barras
Leve	1	1	1/5
Média	10	25	1/3
Pesada	15	35	1/2

Tabela 2. Valores da constante  $k$  para cada sistema-teste

Esses valores foram determinados, de tal forma que, os valores mínimos das menores tensões se enquadrem nas faixas de tensão especificadas na Tabela 1.

- Inserção de GD: Para alocar GDs nas barras no sistema é usado o perfil de tensões nos barramentos. Neste contexto, nos sistemas-teste têm sido alocados GDs, de modo que, as tensões apresentem valores acima de 0,93 p.u.
- Variação da relação  $X/R$  das LT: Os condutores elétricos apresentam uma relação  $X/R$  típica entre 2,5 e 30 para STEE, enquanto que para SDEE a relação  $X/R$  corresponde a valores entre 0,3 e 3 (CARVALHO, 2006; LODDI, 2010). Com base nisso, os valores das reatâncias das LT são alterados para 5, 3, 0,3 e 0,05 vezes a resistência, considerando um cenário de carregamento pesado. Essas alterações foram realizadas inicialmente nos trechos localizados na região central de cada um dos sistemas-teste e posteriormente, nos trechos à montante das barras que apresentaram tensões menores que 9 pu. Por fim, tais alterações foram efetuadas para todas as linhas dos sistemas-teste.

Cabe salientar que com a criação destes cenários de operação é possível validar se o método de Newton-Raphson consegue determinar satisfatoriamente o ponto de operação dos SDEE.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que a comparação entre os métodos de Newton-Raphson e de Soma



de Correntes possa ser realizada, faz-se necessário realizar as seguintes alterações nos sistemas-teste usados na simulação (KERSTING, 2001): foram consideradas as impedâncias próprias das LT, os transformadores foram substituídos por sua impedância série e os reguladores de tensão e capacitores shunt foram desconsiderados.

Visando que os métodos de fluxo de potência sejam comparados de maneira eficaz, esses algoritmos foram implementados em uma mesma plataforma de programação, levando em consideração os mesmos parâmetros de convergência. Dessa forma, o MATLAB® foi o software escolhido e a tolerância admitida foi de  $1 \times 10^{-6}$ . Nesse contexto, as comparações propostas são apresentadas a seguir.

#### 4.1 Diferentes níveis de carregamento

As respostas obtidas pela solução fluxo de potência para os sistemas-teste SDEE 13, 37 e 69 barras, levando em consideração os diferentes cenários de carregamento, são apresentadas na Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3, respectivamente.

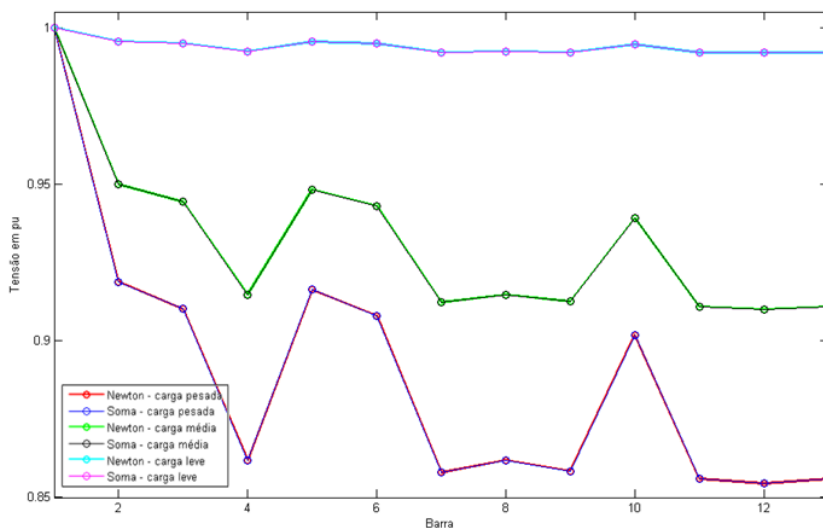


Fig. 1: Sistema-teste de 13 barras - Diferentes níveis de carregamento

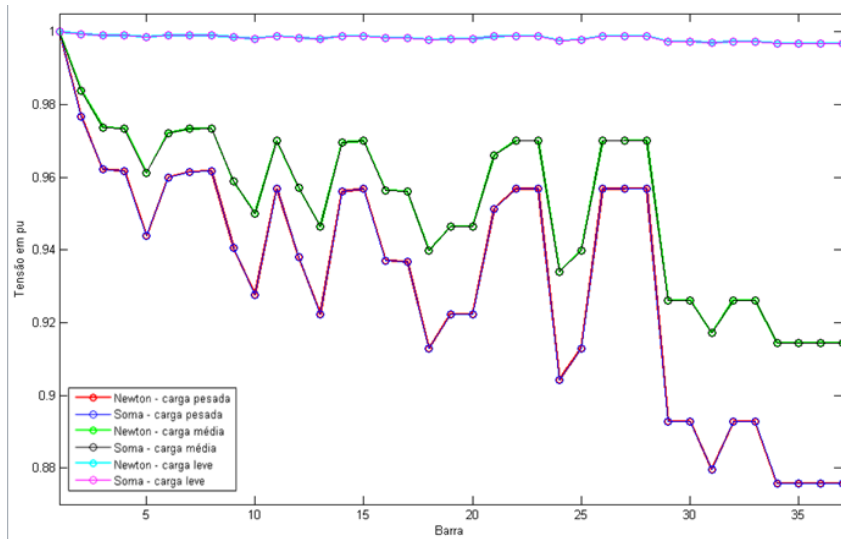


Fig. 2: Sistema-teste de 37 barras - Diferentes níveis de carregamento

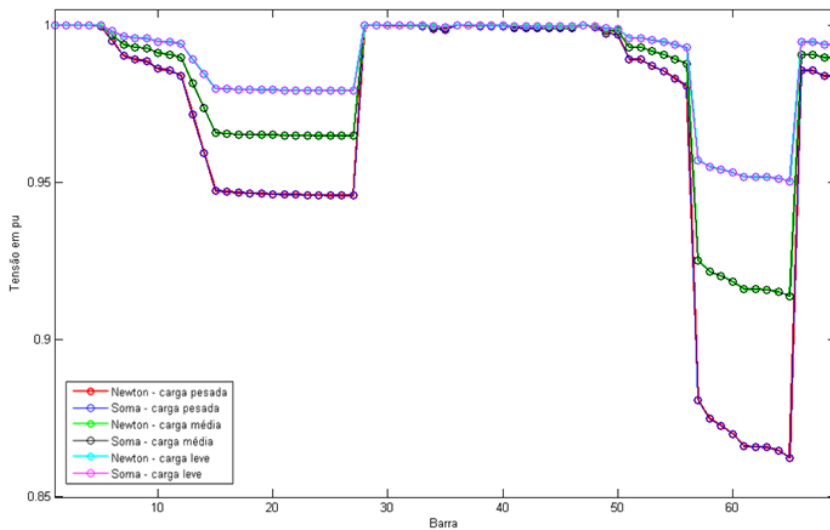


Fig. 3: Sistema-teste de 69 barras - Diferentes níveis de carregamento.

Pode-se apreciar nas figuras anteriores que os métodos de fluxo de potência convergem no mesmo ponto de operação para os três cenários contemplados. O anterior pode ser validado ao comparar os máximos desvios das tensões (módulo e ângulo) e os desvios das perdas de potência mostradas na Tabela 3 para o cenário de carga pesada (tomando como referência os resultados do método de Soma de Correntes).

<i>Sistema-teste</i>	<i>SDEE 13 barras</i>	<i>SDEE 37 barras</i>	<i>SDEE 69 barras</i>
Máximo desvio dos módulos (p.u)	$1,0109e^{-8}$	$3,4142e^{-9}$	$1,4720e^{-5}$
Máximo desvio dos ângulos (graus)	$5,2269e^{-7}$	$1,2845e^{-8}$	$7,5459e^{-5}$
Desvio das perdas de potência ativa (p.u)	$2,5435e^{-7}$	$1,0670e^{-7}$	$3,1265e^{-7}$
Desvio das perdas de potência reativa (p.u.)	$7,7739e^{-7}$	$6,2119e^{-8}$	$3,8783e^{-8}$

Tabela 3. Resultados para o cenário de carga pesada

Nas simulações realizadas percebe-se que o número de iterações aumenta conforme a demanda dos sistemas-teste é incrementada, assim como o tempo computacional, como pode ser visto na Tabela 4.

<i>Sistema-teste</i>	<i>SDEE 13 barras</i>		<i>SDEE 37 barras</i>		<i>SDEE 69 barras</i>	
	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>
Número de iterações	11	9	9	7	6	4
Tempo de cômputo (s)	0,0924	0,0155	0,3986	0,0202	1,1943	0,0319

Tabela 4. Desempenho computacional dos métodos usados

Vale salientar que o elevado número de iterações do método de Newton-Raphson é justificado pela tolerância estabelecida.

## 4.2 Inserção de GDs

Geradores distribuídos foram alocados nas barras com tensões menores para o cenário de carregamento pesado com o intuito de melhorar o perfil de tensão. Desta forma, para o SDEE de 13 e de 37 barras foram alocados geradores nas barras 12 e 34, respectivamente. Os perfis de tensão são apresentados na Fig. 4 e Fig. 5.

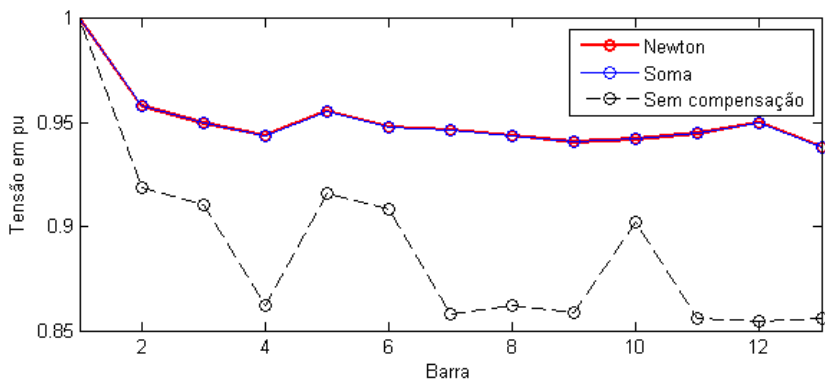


Fig. 4: Perfil de tensão para o SDEE 13 barras.

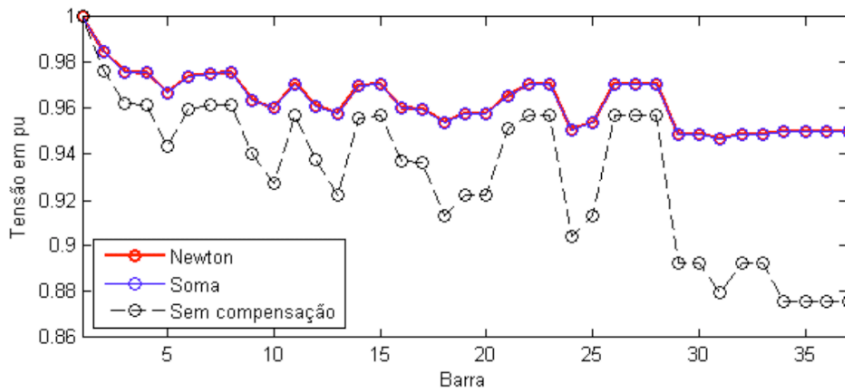


Fig. 5: Perfil de tensão para o SDEE 37 barras.

Por outro lado, no caso particular do sistema de 69 barras, ambos os métodos apresentaram problemas de convergência ao alocar um gerador distribuído na barra 56.

### 4.3 Variações da relação $X/R$ nas LT

Tomando como referência o cenário de carga pesada foram escolhidas arbitrariamente algumas LT para alterar a relação  $X/R$ . O critério adotado para realizar as alterações consiste em identificar os trechos dos sistemas-teste com tensões inferiores a 0,90 p.u. e posteriormente, determinar os pontos de operação para várias relações  $X/R$ , conforme mostrado na Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8.

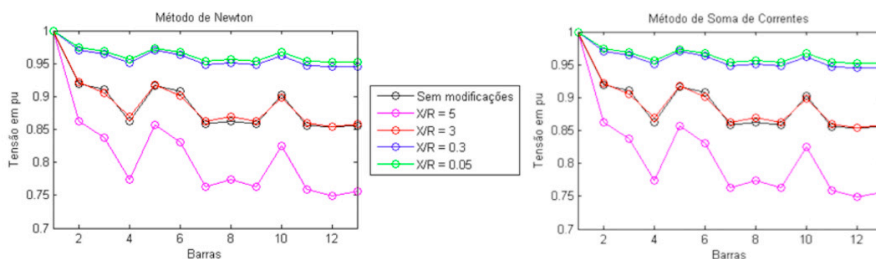


Fig. 6: Perfis de tensão para diferentes valores de  $X/R$  no SDEE 13 barras

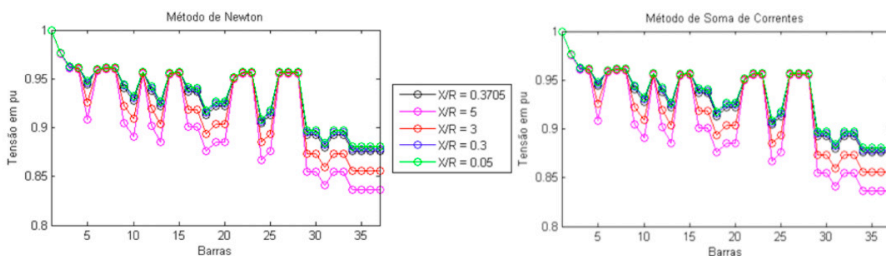


Fig. 7: Perfis de tensão para diferentes valores de  $X/R$  no SDEE 37 barras.

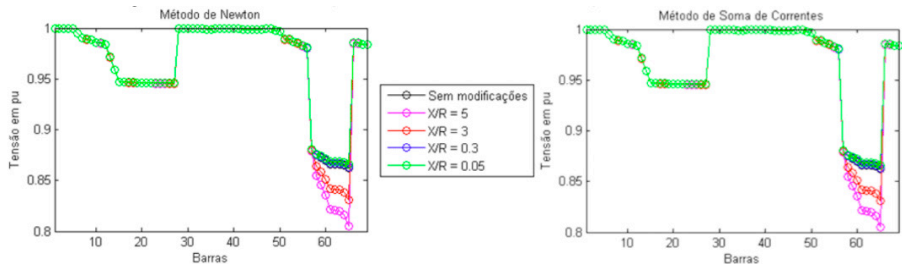


Fig. 8: Perfis de tensão para diferentes valores de  $X/R$  no SDEE 69 barras.

Apesar de que as alterações na relação  $X/R$  incidem na queda de tensão em alguns trechos, o método de Newton-Raphson não apresentou problemas de convergência. Adicionalmente, pode-se perceber que ambos os métodos convergiram no mesmo ponto de operação.

## 5 I CONCLUSÃO

Devido às diferenças encontradas entre os SDEE e os STEE, métodos próprios para solução do problema do fluxo de potência foram propostos. Este trabalho teve a finalidade de investigar se as características intrínsecas dos SDEE tornavam inaplicável o método de Newton-Raphson nos SDEE. Verificou-se, através da revisão bibliográfica, que os métodos de referência para os estudos de fluxo de potência em STEE e SDEE são respectivamente, o método de Newton-Raphson e o de Soma de Correntes. Dessa maneira, os algoritmos de solução do fluxo de potência propostos pelos métodos foram implementados em MATLAB® e aplicados na determinação do ponto de operação de três sistemas-teste.

Os resultados obtidos através dos métodos Newton-Raphson e de Soma de Correntes mostram que ambos os métodos convergiram no mesmo ponto de operação, o que indica que o método de Newton-Raphson pode ser usado para realizar estudos de fluxo de carga em SDEE. De modo geral, pode-se perceber que as diferenças dos resultados numéricos entre ambos os métodos começam a surgir a partir da quinta casa decimal. Vale a pena salientar que, ambos os métodos apresentaram problemas de convergência para as mesmas situações. Essa condição pode estar diretamente relacionada às características dos sistemas-teste analisados e não devido à formulação do método de Newton-Raphson.

Como trabalho futuro, aconselha-se estender as análises realizadas para sistemas-teste de maior porte e, até mesmo, desbalanceados, bem como estudar a alocação ótima de GD em SDEE e incluindo os limites de geração.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_7.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf). Acesso em: 08 abr. 2021.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 725-734, 1989.

BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. **IEEE Transactions on Power System**, v. 10, n. 1, p. 483-491, 1995.

BARAN, M. E.; STATON, E. A. Distribution transformer models for branch current based feeder analysis. **IEEE Transactions on Power System**, v. 12, n. 2, p. 698-703, 1997.

CARVALHO, M. R. Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CESPEDES, R. G. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 391-396, 1990.

CHIANG, H. D. A decoupled load flow method for distribution power networks: algorithms, analysis and convergence study. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 13, n. 3, p. 130-138, 1991.

CIRIC, R. M.; FELTRIN, A. P.; OCHOA, L. F. Power flow in four-wire distribution networks – A general approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 4, p. 1283-1290, 2003.

FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation. **Electric Power Systems Research**, v. 97, p. 51-60, 2013.

GOMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. Electric Energy Systems Analysis and Operation. Boca Raton, FL: Ed. CRC Press, 2009.

GOSWANI, S.; BASU, S. A new for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 3, p. 1484-1491, 1992.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. J. Power System Analysis. New York, NY: Ed. Mc Graw Hill, 1994.

KERSTING, W.H. Radial Distribution Test Feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 6, No. 3, pp. 975-985, 2001.

LODDI, T. Cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de Newton desacoplado rápido com rotação de eixos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2010.



MONTICELLI, A. Fluxo de carga em rede de energia elétrica. São Paulo, SP: Ed. Edgard Blücher, 1983.

MONTICELLI, A. State estimation in Electric Power System: A generalized approach. Boston, MA: Ed. Kluwer Academic Publishers, 1999.

MURUGANANTHAM, B.; GNANADASS, R.; PADHY, N. P. Performance analysis and comparison of load flow methods in a practical distribution system. **IEEE 19th National Power Systems Conference (NPSC)**, 2016.

SAADAT, H. Power System Analysis. New York, NY: Ed. Mc Graw Hill, 1999.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

SHIRMOHAMMADI, D.; CHENG, C. S. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 671-679, 1995.

WASLEY, R. G.; Shlash, M. A. Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, n. 7, p. 630-638, 1974.

ZHANG, F; CHENG, C.S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 1, p. 389-397, 1997.

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

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

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

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021