

# 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. Eloi 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 Livia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
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>

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

Data de aceite: 01/06/2021

### Ednei Luiz Miotto

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Campus Toledo  
Toledo, Paraná, Brasil

### Bruno Rafael Gamino

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

### Elenilson de Vargas Fortes

Instituto Federal de Goiás, Campus Jataí  
Jataí, Goiás, Brasil

### Percival Bueno de Araujo

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira  
Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

### Luís Fabiano Barone Martins

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Campus Toledo  
Jacarezinho, Paraná, Brasil

**RESUMO:** Este trabalho analisa a atuação do dispositivo *Generalize Unified Power Flow Controller* em um sistema de potência de médio porte (Sistema *New England*). São avaliados o controle de tensão nas barras (análise estática) e a influência que o dispositivo exerce na estabilidade a pequenas perturbações (análise dinâmica). No que se refere às pequenas perturbações, são apresentados resultados promissores relacionados com o ajuste coordenado dos parâmetros de Estabilizadores

de Sistema de Potência e do conjunto *Generalize Unified Power Flow Controller- Power Oscillation Damping* (o algoritmo utilizado para o ajuste é a otimização por enxame de partículas).

**PALAVRAS-CHAVE:** Controladores suplementares, Estabilidade a pequenas perturbações, Estabilizadores de Sistema de Potência, *Generalize Unified Power Flow Controller*, Otimização por Enxame de Partículas.

**ABSTRACT:** This paper analyzes the performance of the *Generalized Unified Power Flow Controller* device for voltage control on the bars of an electric power system of medium-sized (system *New England*) to improved voltage stability. Are also presented promising results related to the coordinated adjustment of parameters of *Power System Stabilizers* as well as of the *Generalize Unified Power Flow Controller- Power Oscillation Damping* using the *Particle Swarm Optimization* algorithm, for the introduction of desired rates damping to oscillatory modes low frequency present in analyzed system.

**KEYWORDS:** Additional controllers, Particle Swarm Optimization, Power System Stabilizers, Small signal stability.

## 1 | INTRODUÇÃO

As dificuldades operacionais e de manutenção da estabilidade dos sistemas elétricos de potência (SEPs) foram aumentando à medida que estes sistemas cresciam e interligavam-se, o que acarreta a associação de

uma série de equipamentos com características dinâmicas distintas.

Analisar o comportamento do SEP quando submetido a uma pequena ou grande perturbação é uma tarefa dos engenheiros da área de estabilidade. Se a perturbação é de pequena magnitude (por exemplo, variações de carga ao longo do dia que levam a consequentes ajustes de geração) esta é denominada de estabilidade a pequenas perturbações, a qual será o foco deste trabalho (Kundur et al., 2004).

Uma pequena perturbação é vista como um pequeno desvio no estado do sistema, o que possibilita a linearização, em torno de um ponto de equilíbrio, das equações que o descrevem. Com isto, todas as técnicas de análise de sistemas lineares podem ser utilizadas.

Essa peculiaridade possibilita representar o SEP por modelos lineares. Neste trabalho utiliza-se o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) proposto por Deckmann e Costa (1994), cujo princípio fundamental baseia-se no balanço de potências ativa e reativa em cada barra do sistema, durante todo o processo dinâmico.

A presença de oscilações eletromecânicas de baixa frequência pode comprometer a operação do SEP, motivo pelo qual estratégias de controle para introduzir amortecimento a estas oscilações tornam-se necessárias.

Os primeiros passos para o projeto de Estabilizadores de Sistema de Potência (ESPs) foram dados por DeMello e Concordia (1969), e teve sua continuidade com as pesquisas realizadas por e Larsen e Swann (1981). Tais estabilizadores são comumente utilizados para agregar amortecimento, principalmente nos modos de oscilação do tipo local.

Ao longo do tempo, novos dispositivos foram incorporados ao SEP para melhorar seu controle e torná-lo mais flexível e seguro. São os chamados *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) (Hingorani and Gyugyi, 2000), em que se destaca o *Generalized Unified Power Flow Controller* (GUPFC) (Lubis et al., 2011; Valle and Araujo, 2015). Estudos posteriores mostraram que se à malha de controle deste dispositivo for acoplado um controlador *Power Oscillation Damping* (POD), é possível inserir amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do SEP, em especial nas do tipo interárea (Furini et al., 2011).

No entanto, para que os controladores ESPs e o conjunto GUPFC-POD desempenhem satisfatoriamente o papel de inserir amortecimento aos modos oscilatórios do SEP, o ajuste de seus parâmetros é fundamental. Diferentes métodos de otimização vêm sendo utilizados com sucesso para este ajuste, como uma alternativa aos métodos clássicos já bastante consolidados na literatura.

Para ajustar os parâmetros dos controladores neste trabalho é utilizado um método de otimização baseado no algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) proposto por Kennedy e Eberhart (1995). Este algoritmo já foi utilizado em diferentes aplicações e se destacou com os resultados obtidos. Em Ravi e Rajaram (2013) o PSO foi utilizado para a

localização ótima de dispositivos FACTS no SEP. Em Singh et al. (2014) o PSO foi utilizado na solução do fluxo de potência ótimo em dois sistemas testes onde atuam dispositivos FACTS.

Neste trabalho também é analisada a atuação do dispositivo GUPFC no controle de fluxo de potência com o intuito de corrigir as subtensões apresentadas por algumas barras do SEP analisado.

Para a validação da metodologia proposta foram realizadas simulações utilizando-se o *software MatLab<sup>®</sup>* em um sistema teste considerado de médio porte conhecido como *New England*.

## 2 | MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA DO GUPFC

O modelo de injeção de potência para representar o GUPFC no fluxo de potência é baseado na configuração mais simples do dispositivo, que utiliza apenas três conversores fonte de tensão (VSCs) conectados entre si através de um link comum de corrente contínua (Lubis et al., 2011).

As equações a seguir são baseadas na Fig.1. Esta representa o circuito equivalente do GUPFC que será modelado por uma fonte de corrente ideal ( $\tilde{I}_{sh}$ ) conectada em derivação com a barra comum  $i$  de instalação, e por duas fontes de tensão série que injetam no sistema tensões síncronas de amplitude e ângulo de fase controlável ( $\tilde{V}_{Sin}$ ). Em série com cada uma das fontes está a susceptância ( $b_{in}$ ) que modela os transformadores de acoplamento. É através da modulação da amplitude e ângulo de fases da tensão série injetada  $\tilde{V}_{Sin}$  que o GUPFC controla os fluxos de potência nas LTs onde está instalado, como mostrado na Fig. 1 (Valle and Araujo, 2015).

$$\tilde{V}_{Sin} = r_n e^{j\gamma_n} \tilde{V}_i, \text{ sendo } n = j, k \quad (1)$$

Em (1),  $r_n$  e  $\gamma_n$  são os parâmetros das tensões série injetadas, sendo  $r_n = \tilde{V}_{Sin} / \tilde{V}_i$ , e  $\gamma_n$ , o ângulo relativo de  $\tilde{V}_{Sin}$  com a respectiva tensão da barra  $\tilde{V}_i$ .

As grandezas  $\tilde{V}'_j$  e  $\tilde{V}'_k$  correspondem às tensões nas barras fictícias utilizadas na modelagem do dispositivo.  $P_i$  e  $Q_i$  é a injeção de potência complexa na barra  $i$  do sistema;  $P_{ji}$  e  $Q_{ji}$  são os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $i$ - $j$ , saindo da barra  $j$ ,  $P_{ki}$  e  $Q_{ki}$  são os fluxos de potências ativa e reativa no ramo  $i$ - $k$ , saindo da barra  $k$  e,  $I_{ji}$  e  $I_{ki}$ , são as correntes nos ramos  $i$ - $j$  e  $i$ - $k$ , saindo das barras  $j$  e  $k$ , respectivamente.

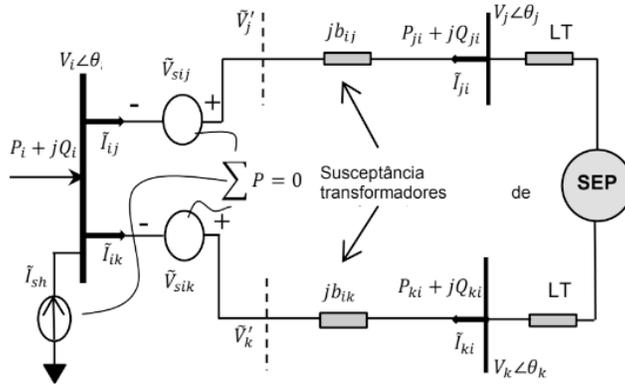


Figura 1. Circuito equivalente do GUPFC.

A tensão controlável ( $\tilde{V}_{Sin}$ ) pode ser decomposta nas componentes em quadratura ( $V_{pn}$ ) e em fase ( $V_{qn}$ ) com a tensão ( $\tilde{V}_i$ ) da barra comum de instalação, conforme eqs. (2) e (3) (ver diagrama fasorial da Fig. 2).

$$V_{pn} = r_n V_i \text{sen}(\gamma_n) \quad (2)$$

$$V_{qn} = r_n V_i \text{cos}(\gamma_n) \quad (3)$$

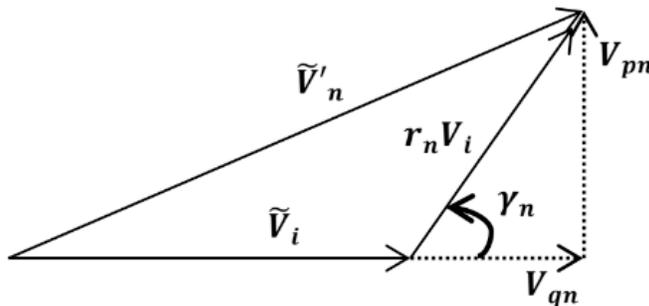


Figura 2. Diagrama fasorial do GUPFC.

No modelo de injeção de potência do GUPFC, a fonte de corrente ideal ( $\tilde{I}_{sh}$ ) é decomposta em duas componentes, uma em fase ( $i_p$ ) e outra em quadratura ( $i_q$ ) com a tensão ( $\tilde{V}_i$ ) da barra comum de instalação  $i$ , como descrito em (4).

$$\tilde{I}_{sh} = (i_p - j i_q) e^{j\theta_i} \quad (4)$$

Uma restrição importante que deve ser satisfeita para a correta implementação do GUPFC no fluxo de potência diz respeito à troca de potência ativa entre seus conversores. Assim, quando as perdas são desconsideradas, toda a potência ativa fornecida pelo

conversor *shunt* VSC1 deve ser igual à potência entregue ao sistema CA pelos conversores série VSC2 e VSC3 como mostrado na eq. (5) (Lubis et al., 2011).

$$P_{sh} = -\sum_{(m=i,j,k)} P_{se,m} \quad (5)$$

Considerando a restrição apresentada em (5), o circuito equivalente do GUPFC ilustrado na Fig. 1 e as eqs. (1)(4), chega-se ao modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS GUPFC (eqs. (6) (9)), baseado no modelo apresentado em (Valle and Araujo, 2015), que representa a soma das contribuições séries das fontes de tensão síncronas e a contribuição *shunt* da fonte de corrente ideal.

$$P_{inj,i} = -\sum_{(n=j,k)} b_{in} V_n [V_{qn} \text{sen}(\theta_{in}) + V_{pn} \text{cos}(\theta_{in})] \quad (6)$$

$$Q_{inj,i} = -V_i \sum_{(n=j,k)} b_{in} V_{qn} - V_i i_q \quad (7)$$

$$P_{inj,n} = b_{in} V_n [V_{qn} \text{sen}(\theta_{in}) + V_{pn} \text{cos}(\theta_{in})] \quad (8)$$

$$Q_{inj,n} = b_{in} V_n [V_{qn} \text{cos}(\theta_{in}) - V_{pn} \text{sen}(\theta_{in})] \quad (9)$$

As eqs. (6)(9) descrevem o modelo de injeção de potência do GUPFC em termos das componentes em fase e quadratura da tensão do barramento comum de instalação do dispositivo ( $\check{V}_i$ ).  $P_{inj,i}$  e  $Q_{inj,i}$  são as injeções de potência ativa e reativa na barra comum de instalação do dispositivo.  $P_{inj,n}$  e  $Q_{inj,n}$ , com  $n = j, k$ , são as injeções de potência ativa e reativa nas barras  $j$  e  $k$  de instalação, respectivamente. Na Fig. 3 é ilustrado o modelo de injeção de potência e os fluxos de potências ativa e reativa ( $P_{Lj}$ ,  $Q_{Lj}$ ,  $P_{Lk}$  e  $Q_{Lk}$ ) controlados nas duas LTs que o GUPFC gerencia.

O modelo apresentado também facilita a inclusão do GUPFC nos programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, já que mantém inalterada as equações de fluxo de potência convencional para as barras sem o dispositivo e considera as contribuições do GUPFC como injeções de potência ativa e reativa, nas barras onde está conectado.

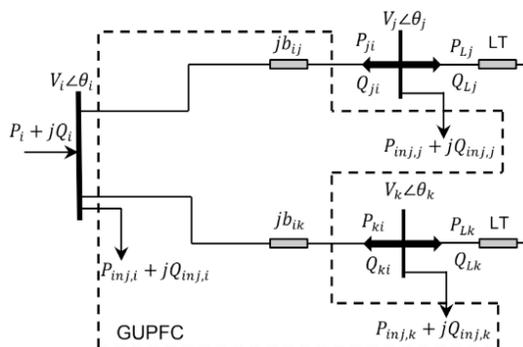


Figura 3. Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC.

Em (10) e (11) são apresentados os balanços de potências ativa e reativa nas barras de instalação do dispositivo, sendo  $m = i, j, k$ .

$$0 = P_{gm} - P_{inj,m} - P_{cm} - P_{calc,m} \quad (10)$$

$$0 = Q_{gm} - Q_{inj,m} - Q_{cm} - Q_{calc,m} \quad (11)$$

Em (10) e (11),  $P_{gm}$  e  $Q_{gm}$  são as gerações de potências ativa e reativa entrando na barra  $m$ ,  $P_{cm}$  e  $Q_{cm}$  são possíveis cargas ativa e reativa conectadas à barra  $m$ , e  $P_{calc,m}$  e  $Q_{calc,m}$  são as potências ativa e reativa transmitidas através das LTs, deixando a barra  $m$ .  $P_{inj,m}$  e  $Q_{inj,m}$  são as potências ativa e reativa referentes às injeções de potência controladas pelo GUPFC. O balanço de potências ativa e reativa nas barras controladas pelo dispositivo resultam nas expressões dos fluxos controlados que são representados por (12) e (13), sendo  $n = j, k$ .

$$P_{Ln} = -P_{ni} - P_{inj n} \quad (12)$$

$$Q_{Ln} = -Q_{ni} - Q_{inj n} \quad (13)$$

Nas equações (12) e (13)  $P_{ni}$  e  $Q_{ni}$  são os fluxos convencionais de potências ativa e reativa e,  $P_{Ln}$  e  $Q_{Ln}$  são os fluxos controlados pelo dispositivo e servirão como entradas da estrutura de controle do GUPFC.

## 2.1 Estrutura do Sistema de Controle do GUPFC

A estrutura de controle utilizada para representar a dinâmica do dispositivo é apresentada na Fig. 4, onde cada controlador PI está relacionado com uma variável das fontes de tensão que representam os conversores VSCs série e *shunt* (Valle and Araujo, 2015). Na Fig. 4 os ganhos  $K_{p1}$  a  $K_{p4}$  e as constantes de tempo  $T_{i1}$  a  $T_{i4}$  são os parâmetros dos controladores PI. Já o ganho  $K_r$  e a constante de tempo  $T_r$  estão relacionados com a regulação da tensão do barramento comum de instalação do GUPFC. A constante de tempo  $T_m$  está relacionada com o tempo de processamento do sistema de controle do dispositivo, cuja faixa varia de 1ms a 10ms (Hingorani and Gyugyi, 2000). O sinal de controle suplementar  $V_{sup}$  (provindo do controlador POD) modula a componente em quadratura ( $V_{pj}$ ) da fonte de tensão do conversor VSC2, cujo objetivo é fornecer amortecimento adicional às oscilações eletromecânicas do SEP.

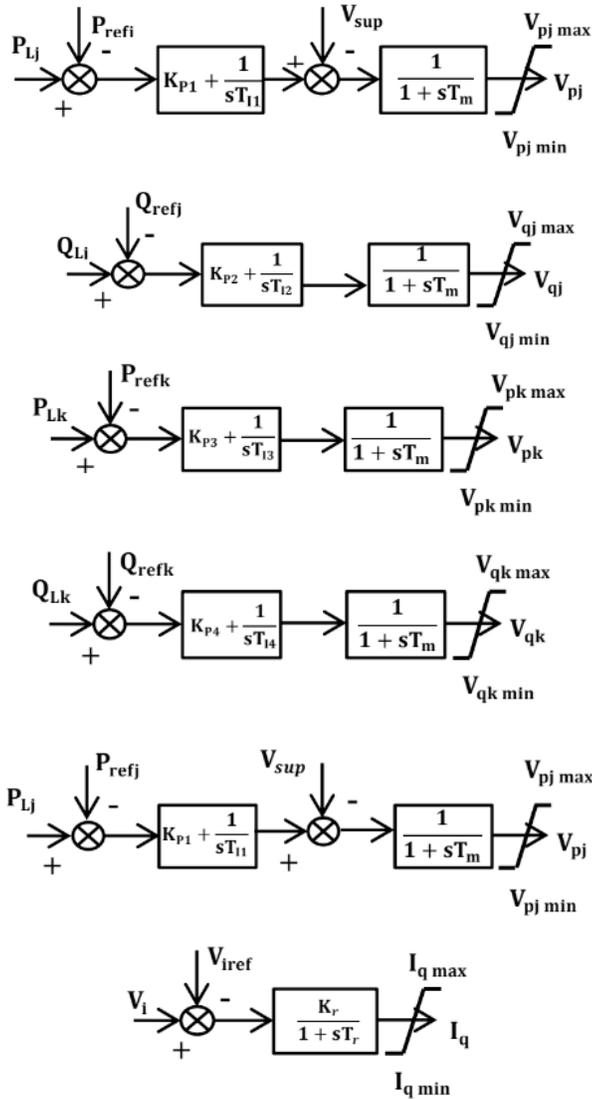


Figura 4. Estrutura do sistema de controle do GUPFC.

Na Fig. 4  $P_{refj}$  e  $Q_{refj}$  são os valores especificados pelo operador do sistema para o fluxo de potências ativa e reativa nas LTs  $i-n$ , onde  $n = j, k$ .  $V_{iref}$  é a tensão de referência na barra comum de instalação do FACTS e  $V_i$  é a tensão na barra  $i$  controlada pelo GUPFC através da modulação da corrente  $I_q$  em quadratura do conversor VSC1.

### 3 I CONTROLADORES ESP E POD

A fim de introduzir amortecimento às oscilações do SEP é necessária a inclusão de controladores suplementares de amortecimento como o ESP e o POD.

Na Fig. 5 é apresentada uma estrutura genérica que pode ser utilizada para ambos os controladores ESP e POD.

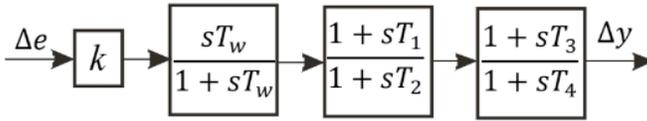


Figura 5. Estrutura para os controladores ESP e POD.

As semelhanças entre esses dois controladores devem-se ao fato de ambos possuírem um bloco de filtro *washout*, blocos de avanço-atraso de fase e um ganho estático representado por  $K_{PSS}$  para o ESP e  $K_{POD}$  para o POD. Como sinal de entrada  $\Delta e$  para o ESP é utilizada a variação de velocidade angular ( $\Delta\omega_k$ ) do gerador  $k$ . Para o POD a entrada é o desvio do fluxo de potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) na LT adjacente à de instalação do conjunto GUPFC-POD.

Quanto às saídas,  $\Delta y$ , no ESP é a tensão ( $\Delta V_s$ ), inserida como sinal adicional à malha de controle do Regulador Automático de Tensão (RAT), que neste trabalho utiliza um modelo de primeira ordem para representá-lo. No POD é gerado um sinal estabilizante ( $\Delta V_{sup}$ ) que é somado à malha de controle do dispositivo FACTS GUPFC, de forma a modular a componente em quadratura  $V_{pj}$  do conversor secundário do dispositivo.

A representação do SEP modelado pelo MSP, incluindo as equações diferenciais dos controladores ESPs e o conjunto GUPFC-POD, permite obter a matriz de estados do sistema completo e analisar sua estabilidade a pequenas perturbações.

#### 4 | PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

A técnica *Particle Swarm Optimization* foi desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995). Ela se baseia na metáfora do comportamento social que foi concebido a partir de observações de grupos de animais na natureza, tais como bando de pássaros e cardume de peixes. Esta população de indivíduos, mais comumente chamada de partículas, apresenta-se com capacidade individual limitada, porém, com comportamento coletivo inteligente.

A cada iteração do algoritmo, as partículas (possíveis soluções do problema) movem-se através de um espaço de busca (região *N-dimensional*) influenciadas por suas melhores experiências anteriores e também pelas melhores experiências de suas partículas vizinhas, na procura pelo ponto ótimo.

De modo a direcionar os voos das partículas para regiões mais promissoras do espaço de busca, um coeficiente de inércia  $\beta$  é utilizado pelo algoritmo para aumentar a sua capacidade de busca (Shi and Eberhart, 1998). Valores de  $\beta$  entre 0,8 e 1,20 dão ao PSO melhores chances de encontrar o ótimo global com um número moderado de iterações.

Neste trabalho o valor de  $\beta$  foi fixado em 0,8 para todas as simulações realizadas. A equação da velocidade agregando o fator de inércia é apresentada em (14).

$$v_{ij}^{t+1} = \beta v_{ij}^{t+1} + \rho_1 r_{1j}^t (p_i^t - x_{ij}^t) + \rho_2 r_{2j}^t (p_g - x_{ij}^t) \quad (14)$$

Os coeficientes de aceleração  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , juntamente com os valores randômicos  $r_1$  e  $r_2$ , ponderam a influência estocástica dos fatores cognitivo e social da velocidade da partícula, respectivamente. Segundo Bratton e Kennedy (2007) quando  $\rho_1 + \rho_2 < 4,0$ , pode levar o enxame de partículas a uma convergência lenta ou até mesmo não convergir. Porém, se  $\rho_1 + \rho_2 > 4,0$ , a convergência do método pode ser rápida e garantida. Este trabalho considerou  $\rho_1 + \rho_2 = 4,0$ , sendo  $\rho_1 = \rho_2 = 2,0$ . Também foi considerado uma população de 20 partículas e limitado a um número máximo de 500 testes da função objetivo.

Na eq. (15) é representa a função objetivo considerada neste trabalho, cujo cálculo é realizado a partir do módulo da diferença entre os autovalores calculados ( $\lambda_{is}$ ) e os desejados ( $\lambda_j$ ), sendo  $np$  o número de autovalores de interesse e  $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_r$

$$Fo = \min \sum_{i=1}^{np} |\lambda_{is} - \lambda_i| \quad (15)$$

O PSO minimiza (15), sujeita ao conjunto de restrições definidas por (16) que impõem um amortecimento mínimo para cada autovalor, isto é,  $\xi_i \geq \xi_{iesp}$  em que  $\xi_{iesp}$  representa o amortecimento especificado (neste trabalho serão especificados de amortecimento mínimo para os modos local e interárea). A restrição  $\sigma_i \leq 0$  verifica se todos os autovalores têm parte real negativa, garantindo a estabilidade do sistema, independente dos parâmetros ajustados ( $K$ ,  $T_1=T_3$  e  $T_2=T_4$ ) pelo PSO.

$$\begin{aligned} \xi_i &\geq \xi_{iesp} \\ \sigma_i &\leq 0 \\ K^{min} &\leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} &\leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} &\leq T_2 \leq T_2^{max} \end{aligned} \quad (16)$$

## 5 | SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A fim de validar os ajustes dos controladores ESP e POD pelo PSO e a eficiência do GUPFC no controle do fluxo de potência e aumento da margem de estabilidade do SEP, várias simulações foram realizadas. O sistema teste utilizado foi *New England*, cujo diagrama unifilar é mostrado na Fig. 6. Este sistema é composto de 10 geradores, 41 barras (incluindo as duas barras fictícias relacionadas com o GUPFC) e 48 linhas de transmissão e está disposto em duas áreas: a área 1 é representada de maneira compacta pelo gerador equivalente 10 (sistema *New York*) e a área 2 pelos demais geradores (sistema *New*

England). Seus dados completos podem ser encontrados em Araujo and Zanetta (2001).

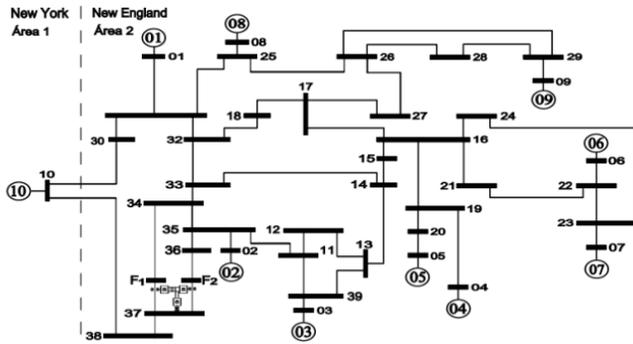


Figura 6. Diagrama unifilar: sistema *New England*.

Neste trabalho será chamado de Caso Base aquele que considera o GUPFC instalado no sistema teste sem controlar o mesmo. Para todas as simulações foi considerado uma reatância de 0,01 pu para os transformadores de acoplamento série e os valores dos parâmetros dos controladores PIs são os mesmos utilizados em Valle and Araujo, 2015.

O perfil das tensões para o caso base é mostrado na Fig. 7 onde se observa que a tensão está abaixo de 0,95 pu em seis barras do SEP (barras 12, 15, 33, 34, 36 e 37). Para melhorar o perfil de tensão do sistema como um todo, o GUPFC irá atuar no controle do fluxo de potência ativa e injeção de potência reativa. Esta ação de controle será chamada de Caso 2.

O local escolhido para instalação do dispositivo FACTS fica próximo à maioria das barras com problemas de tensão, sendo a barra 37 escolhida como barra comum para a instalação do GUPFC.

Para o Caso 2 ocorre um aumento e uma inversão dos fluxos de reativo em ambos os trechos controlados pelo dispositivo (barra  $F1$  à barra 34 e barra  $F2$  à barra 36), através da atuação dos conversores série e *shunt*, conforme apresentado na Tabela 3. Essa ação provocou a melhoria global do perfil de tensão do sistema mostrado na Fig. 7.

Considerando ainda este mesmo caso, foram calculados os autovalores da matriz de estados do sistema teste e na Tabela 1 são mostrados os modos oscilatórios de interesse, coeficiente de amortecimento  $\xi$ , e frequência natural não amortecida  $\omega_n$  para ambas as situações, ou seja, Caso Base e Caso 2. Uma rápida análise dessa tabela permite concluir que a atuação do GUPFC pouco influenciou no amortecimento dos modos eletromecânicos de interesse, sendo necessárias outras ações de controle para garantir taxas adequadas de amortecimentos a estes modos oscilatórios.

Na Tabela 1 são apresentados os nove modos oscilatórios de interesse, sendo

os oito primeiros modos locais e o último o modo interárea. Considerando o Caso 2 nas análises seguintes, têm-se três modos locais instáveis e um modo interárea fracamente amortecido, caracterizando instabilidade no SEP.

<b>Caso Base – GUPFC Desligado</b>			
Modo	<b>Autovalores</b>	$\xi$ (pu)	$\omega_n$ (Hz)
L1	-0,2399 ± j 8,309	0,02886	1,3224
L2	-0,1824 ± j 8,264	0,02207	1,3152
L3	-0,2641 ± j 8,083	0,03265	1,2865
L4	-0,2116 ± j 7,167	0,02951	1,1406
L5	<b>0,08495 ± j 6,848</b>	<b>-0,0124</b>	<b>1,0899</b>
L6	<b>0,1719 ± j 5,912</b>	<b>-0,02906</b>	<b>0,9409</b>
L7	<b>0,1251 ± j 6,355</b>	<b>-0,01968</b>	<b>1,0115</b>
L8	-0,1087 ± j 6,451	0,01685	1,0267
I	<b>0,0042 ± j 3,505</b>	<b>-0,00121</b>	<b>0,5578</b>
<b>Caso 2 – GUPFC Atuando</b>			
Modo	<b>Autovalores</b>	$\xi$ (pu)	$\omega_n$ (Hz)
L1	-0,2411 ± j 8,323	0,02896	1,3251
L2	-0,1887 ± j 8,277	0,02279	1,3177
L3	-0,266 ± j 8,096	0,03286	1,2892
L4	-0,232 ± j 7,199	0,03216	1,1464
L5	<b>0,0733 ± j 6,839</b>	<b>-0,01072</b>	<b>1,0885</b>
L6	<b>0,1802 ± j 5,914</b>	<b>-0,0305</b>	<b>0,9417</b>
L7	<b>0,1612 ± j 6,395</b>	<b>-0,0252</b>	<b>1,018</b>
L8	-0,1367 ± j 6,484	0,02108	1,0322
I	-0,00457 ± j 3,560	0,00128	0,5667

Tabela 1. Autovalores Dominantes,  $\xi$  e  $\omega_n$  – Caso Base e Caso 2.

Para resolver o problema da instabilidade no sistema teste serão instalados nove ESPs na malha de controle dos RATs das unidades geradoras 1 a 9 e um controlador POD na malha de controle do GUPFC a fim de fornecer amortecimento adicional aos modos oscilatórios de interesse. Para a localização dos ESPs no SEP foi realizada uma análise dos fatores de participação (Milano, 2010).

Após o processamento do algoritmo PSO foram determinados os parâmetros dos controladores suplementares (Tabela 2), respeitando o conjunto de restrições apresentado em (8) através de limites máximos e mínimos de cada variável.

Dispositivo	$T_1 = T_3$	$T_2 = T_4$	K
ESP G1	0,7921	0,0972	12,821
ESP G2	0,6322	0,0971	10,176
ESP G3	0,4407	0,1793	13,678
ESP G4	0,7812	0,1276	8,860
ESP G5	0,7940	0,0967	11,356
ESP G6	0,7737	0,1247	7,131
ESP G7	0,4166	0,1761	10,798
ESP G8	0,4358	0,0993	13,895
ESP G9	0,4475	0,1890	7,1728
GUPFC – POD	0,2485	0,2496	0,3079

Tabela 2. Parâmetros dos Controladores ESP e GUPFC – POD.

Considerando a atuação dos ESPs e do conjunto GUPFC-POD foram calculados os autovalores da matriz de estados e os modos oscilatórios de interesse são mostrados na Tabela 4. Analisando os dados apresentados conclui-se que o ajuste dos controladores realizado pelo PSO cumpriu o objetivo que era fornecer um amortecimento mínimo de 10% para todos os modos de interesse (locais e interárea).

Modo	Autovalores	$\xi$ (pu)	$\omega_n$ (Hz)
L1	-1,629 ± j 9,1396	17,55	1,4775
L2	-1,455 ± j 8,5934	16,70	1,3872
L3	-1,0931 ± j 7,419	14,58	1,1935
L4	-0,690 ± j 7,1796	10,01	1,1479
L5	-0,928 ± j 7,1028	12,95	1,14
L6	-2,206 ± j 6,865	30,60	1,1477
L7	-1,5313 ± j 6,860	21,78	1,1187
L8	-1,692 ± j 6,0447	26,95	0,9990
I	-0,541 ± j 3,6454	14,68	0,5865

Tabela 4. Autovalores Dominantes,  $\xi$  e  $\omega_n$  – Controladores Adicionais em Operação.

## 6 | CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou o PSO para ajustar de forma coordenada e simultânea os parâmetros dos controladores suplementares ESPs e do conjunto GUPFC-POD, instalados em um SEP multimáquinas modelado através do MSP.

Considerando a atuação no SEP desses controladores já ajustados pelo PSO, verificou-se que o sistema torna-se estável para o ponto de operação considerado no Caso Base. Conclui-se então pela eficácia do algoritmo PSO no ajuste coordenado dos parâmetros desses controladores, de modo a fornecer amortecimento mínimo estipulado a

todos os modos de interesse (Modos Locais e Modos Interárea).

Outro problema observado neste trabalho está relacionado com o nível de tensão (abaixo de 0,95 pu para o caso base) apresentado por algumas barras do sistema *New England*, o que pode comprometer a estabilidade de tensão. Neste caso, após a atuação do controlador FACTS GUPFC, a tensão nestas barras foi elevada para níveis acima de 0,95 pu melhorando significativamente a margem de estabilidade de tensão do SEP analisado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

Araujo, P. B. and Zanetta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electric Power and Energy Systems* 23(3): 173-178.

Bratton, D. and Kennedy, J. (2007). Defining a standard for particle swarm optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium, Honolulu. Proceedings. Honolulu: IEEE.* pp. 120–127.

DeMello, F. P. and Concordia, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans. on PAS* 88(4): 316-329.

Deckmann, S. M. and Da Costa, V. (1994). A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Trans. on PAS* 9(2): 965-971.

Furini, M. A.; Pereira, A. L. S. and Araujo, P. B. (2011). Pole Placement by Coordinated Tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD Stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 33(3): 615-622.

Hingorani, N. G. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE press, New York.

Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, *Neural Networks, 1995. Proceedings, IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 1942-1948.

Kundur, P., et al, (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on power systems* 19(2): 1387-1401.

Larsen, E. V. and Swann, D. A. (1981). Applying System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS*, pp. 3025-3033.

Lubis, R. S., et al, (2011). Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow. *Proc. International conference on electrical engineering and informatics*, pp. 1 – 6.

Milano, F. (2010). *Power system modeling and scripting. London: Springer*, pp. 558, 2010.

Ravi, K. and Rajaram, M. (2013). Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization. *Electrical Power and Energy Systems*. No 49(2013), pp. 333-338.

Shi, Y. and Eberhart, R. (1998). A modified particle swarm optimizer. *Proceedings., IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Anchorage: IEEE, pp. 69–73.

Singh, R. P., et al. (2014). Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for optimal power flow problem with FACTS devices. *Electrical Power and Energy Systems*. No 64(2015), pp. 1185-1196.

Valle, D. and Araujo, P. (2015). The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 65: 299-306.

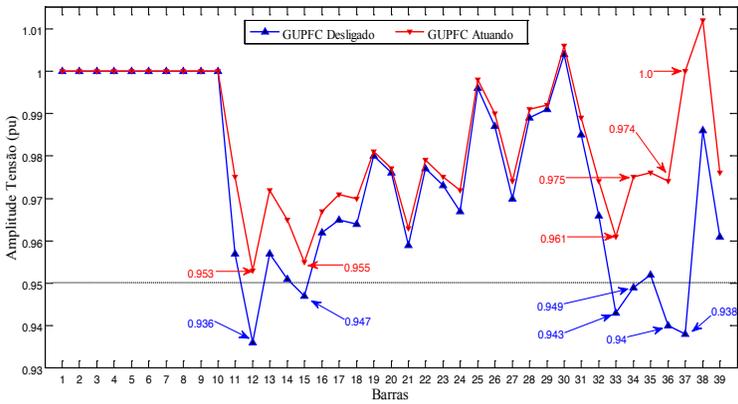


Figura 7. Perfil das tensões antes e após a atuação do GUPFC no sistema *New England*

Linha De - Para	Com GUPFC - Desligado				Com GUPFC – Caso 2			
	P <sub>km</sub>	Q <sub>km</sub>	Perdas		P <sub>km</sub>	Q <sub>km</sub>	Perdas	
			P	Q			P	Q
38 - 10	<b>-33,90</b>	<b>-110,65</b>	0,04	1,00	<b>15,34</b>	<b>-13,99</b>	0,024	0,61
37 - 38	<b>-33,48</b>	<b>-139,24</b>	0,422	6,65	<b>15,37</b>	<b>-52,01</b>	0,03	0,48
F1 - 34	<b>-280,36</b>	<b>-41,5</b>	0,72	10,07	<b>-308,40</b>	<b>83,0</b>	0,856	11,99
F2 – 36	<b>-208,16</b>	<b>-9,23</b>	0,197	2,26	<b>-228,97</b>	<b>92,32</b>	0,258	2,97
36 – 35	-441,35	-88,61	1,37	21,01	-462,23	12,78	1,353	20,75
2 – 35	543,77	231,01	0,00	87,26	542,69	133,25	0,00	78,07
11 – 35	348,39	25,12	0,936	10,96	366,30	-48,42	1,001	11,73
35 – 34	448,51	71,05	0,456	5,92	444,41	11,03	0,415	5,39
34 - 33	166,97	30,68	0,26	4,15	134,74	94,91	0,239	3,83

Tabela 3. Fluxo de Potência Controlado pelo GUPFC no Sistema *New England*

## 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