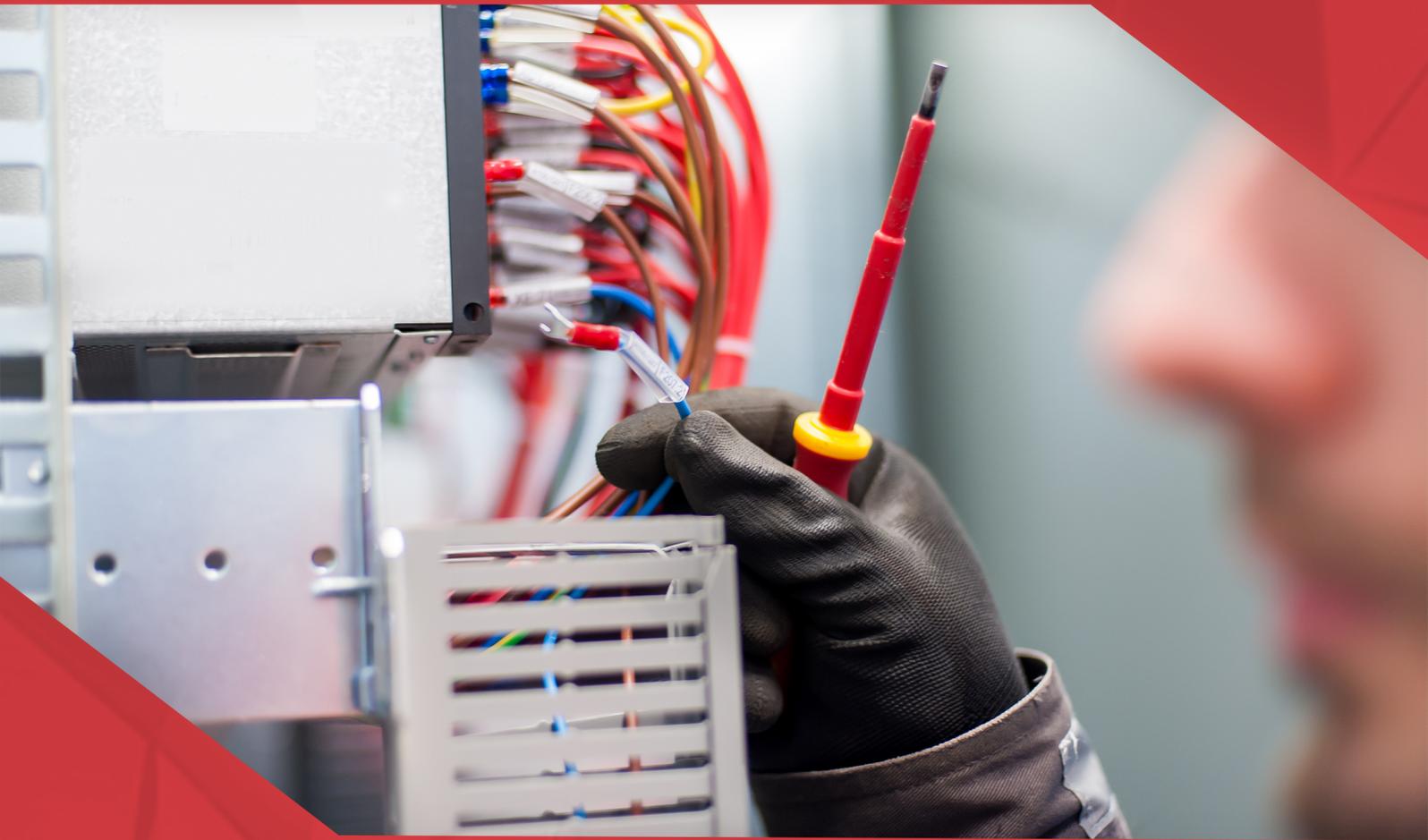


# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)



# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)



2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Karine de Lima

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
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. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
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 Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
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. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

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. 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  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof<sup>a</sup> Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A642 A aplicação do conhecimento científico na engenharia elétrica  
[recurso eletrônico] / Organizadores João Dallamuta, Henrique  
Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-932-5

DOI 10.22533/at.ed.325201701

1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João.  
II. Holzmann, Henrique Ajuz.

CDD 623.3

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

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

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

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

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

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PANORAMA ATUAL E CENÁRIO 2025 DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	
Isabela Valpecovski Urbanetz Allana de Moura Netto Bruno Scolari Vicente Leite Jair Urbanetz Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
GESTÃO EFICIENTE DAS ANUIDADES REGULATÓRIAS NA CEMIG DISTRIBUIÇÃO	
Rosane de Pinho Matos Viviane Fernanda de Aguiar Pereira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>21</b>
DESAFIOS DA REVISÃO PERIÓDICA DE AJUSTES DE GRANDES SISTEMAS -NORMAS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS	
Rodrigo A. Benes Ferreira Mario Roberto Bastos Nilson José Francischetti Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ENERGÉTICA DE UM SISTEMA INTEGRANDO MÁQUINA BIOPEIXES E REATOR MULTIFUNCIONAL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Francisco de Assis da Silva Mota Francisco Francielle Pinheiro dos Santos Paula Cristina de Amorim Andrade	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>48</b>
ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	
Francisco Jeandson Rodrigues da Silva Ailson Pereira de Moura Adriano Aron Freitas de Moura Douglas Aurélio Carvalho Costa Obed Leite Vieira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>61</b>
CARACTERIZAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO DOS SFVCR NO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS	
Diego Piazza Hilgert Jair Urbanetz Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017016</b>	

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>75</b>
GEOCORTE CEMIG D: SELEÇÃO ÓTIMA DE ALVOS DE CORTE USANDO GEORREFERENCIAMENTO: DESENVOLVIMENTO SAP/CCS	
Wellington Fazzi Cancian Andre Luiz Soares Charles Ramos Pimenta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017017</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>89</b>
ÍNDICES DE REFERÊNCIA PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA CABOS PARA-RAIOS ENERGIZADOS	
José Ezequiel Ramos Alexandre Piantini Ary D'Ajuz Valdemir Aparecido Pires Paulo Roberto de Oliveira Borges	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017018</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>96</b>
A EXPERIÊNCIA DA COPEL COM RELIGADORES MONOFÁSICOS	
Maurício Varassim Hernandes Oscar Kim Júnior Fausto Aurélio Portella Garcia Guilherme Fernandes Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017019</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>108</b>
SISTEMA DE MONITORAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA COM VISTAS A MELHORIA DA QUALIDADE DE SERVIÇO	
Klendson Marques Canuto Avilez Batista de Oliveira Lima Paulo Roberto de Oliveira Braga Juraci Gomes de Aguiar Filho André Ribeiro da Costa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170110</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>122</b>
TÉCNICA DE RESGATE PARA TRABALHOS EM INSTALAÇÕES ENERGIZADAS – MÉTODO AO POTENCIAL	
Fernando César Pepe Wlademir Braido	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170111</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>128</b>
MONITORAMENTO DE DESGASTE DE CONTATOS DOS DISJUNTORES DA SUBESTAÇÃO ISOLADA À GÁS DA UHE BELO MONTE	
Davi Carvalho Moreira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170112</b>	

**CAPÍTULO 13 ..... 139**

COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES A ÓLEO E A SECO

Marco Antonio Ferreira Finocchio  
Márcio Mendonça  
Lucas de Oliveira Antunes  
Jeferson Gonçalves Ferreira

**DOI 10.22533/at.ed.32520170113**

**CAPÍTULO 14 ..... 147**

OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADA A CONTROLADORES DE CORRENTE PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Lucas Cielo Borin  
Iury Cleveston  
Caio Ruviano Dantas Osorio  
Gustavo Guilherme Koch  
Fabricio Moretto Bottega  
Vinicius Foletto Montagner

**DOI 10.22533/at.ed.32520170114**

**CAPÍTULO 15 ..... 161**

OTIMIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE PELA ALOCAÇÃO DE CHAVES AUTOMÁTICAS E USO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ILHAMENTO

Railson Severiano de Sousa  
Camilo Alberto Sepúlveda Rangel  
Criciéle Castro Martins  
Mauricio Sperandio  
Luciane Neves Canha

**DOI 10.22533/at.ed.32520170115**

**CAPÍTULO 16 ..... 175**

COMO SELECIONAR TRANSISTORES DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES ESTÁTICOS?

Edemar de Oliveira Prado  
Pedro Cerutti Bolsi  
Mateus José Tiburski  
Éder Bridi  
Hamilton Confortin Sartori  
José Renes Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.32520170116**

**CAPÍTULO 17 ..... 190**

METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES BOOST PARA APLICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA E ELEVADO GANHO DE TENSÃO

Mateus José Tiburski  
Éder Bridi  
Edemar Oliveira Prado  
Pedro Cerutti Bolsi  
Hamilton Confortin Sartori  
José Renes Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.32520170117**

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>203</b>
INFLUÊNCIA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE CONVERSORES ESTÁTICOS NO VOLUME E PERDAS DE DIFERENTES MATERIAIS MAGNÉTICOS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pedro Cerutti Bolsi</li> <li>Edemar de Oliveira Prado</li> <li>Mateus José Tiburski</li> <li>Éder Bridi</li> <li>Hamiltom Confortin Sartori</li> <li>José Renes Pinheiro</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170118</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>218</b>
WIRELESS CHARGER MANUFACTURING USING INDUCTIVE METHOD	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Maryam Liaqat</li> <li>Sulman Joseph</li> <li>Shamsa Maqsood</li> <li>Ali Raza</li> <li>Sana Aslam</li> <li>Waseem Imtiaz</li> <li>Muhammad Furqan Shoukat</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170119</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>235</b>
TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Djair Pamplona dos Santos</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170120</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>248</b>
OTIMIZAÇÃO DE CONVERSORES BOOST INTERCALADO DE ALTO GANHO DE TENSÃO E ALTA EFICIÊNCIA	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Éder Bridi</li> <li>Mateus José Tiburski</li> <li>Edemar Oliveira Prado</li> <li>Pedro Cerutti Bolsi</li> <li>Hamiltom Confortin Sartori</li> <li>José Renes Pinheiro</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170121</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>262</b>
DETERMINAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAR A INCERTEZA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO AFLUENTE POR SISTEMAS HIDRO METEOROLÓGICOS PARA AUXÍLIO NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS E PLANEJAMENTO HIDROENERGÉTICO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reinaldo Bomfim da Silveira</li> <li>Anderson Nascimento de Araujo</li> <li>Mino Viana Sorribas</li> <li>Camila Freitas</li> <li>Rafael Schinoff Mércio Pereira</li> <li>Ângelo Breda</li> <li>José Eduardo Gonçalves</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170122</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>276</b>



## OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADA A CONTROLADORES DE CORRENTE PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Data de aceite: 03/01/2020

### Lucas Cielo Borin

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

### Iury Cleveston

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

### Caio Ruviano Dantas Osorio

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

### Gustavo Guilherme Koch

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

### Fabrizio Moretto Bottega

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

### Vinicius Foletto Montagner

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)  
Santa Maria - RS

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o projeto de ganhos de controle por realimentação de estados obtidos por meio de otimização por enxame de partículas, aplicado em inversores monofásicos conectados à rede por meio de um filtro LCL. O controle é projetado *off-line* considerando incertezas na impedância de rede, atraso na implementação do sinal de

controle e múltiplos controladores ressonantes. O algoritmo de otimização fornece os ganhos do controlador a partir da minimização de uma função objetivo baseada nos autovalores do sistema em malha fechada. O ganho fornecido garante resultados satisfatórios, nos domínios do tempo e da frequência, mostrando a conformidade das correntes de rede com a norma IEEE 1547 e a viabilidade da técnica para aplicações no controle de corrente de inversores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversores conectados à rede, filtro LCL, otimização por enxame de partículas.

### PARTICLE SWARM OPTIMIZATION APPLIED TO CURRENT CONTROLLERS FOR GRID- CONNECTED INVERTERS

**ABSTRACT:** This work presents the design of state feedback control gains obtained by means of particle swarm optimization, applied to single phase grid-connected inverters through an LCL filter. The control is designed off-line considering uncertainties in the grid impedance, a delay in the implementation of the control signal and multiple resonant controllers. The optimization algorithm provides the control gains from minimizing an objective function based on the closed-loop system eigenvalues. The control gains provided here ensure suitable results, in the time and frequency domains, showing the

compliance of the grid currents with the IEEE 1547 Standard and the viability of the technique for applications in the current control of inverters.

**KEYWORDS:** Grid-connected inverters, LCL filter, particle swarm optimization.

## 1 | INTRODUÇÃO

Inversores conectados à rede são importantes no cenário de geração baseada em energias renováveis permitindo, por exemplo, controlar o fluxo de potência entre a fonte primária e a rede (TEODORESCU et al., 2011, MA, 2013; KJAER et al., 2005; ERICKSON, 1997). Neste contexto, um problema importante é o controle das correntes injetadas na rede, que devem respeitar limites rigorosos de distorção harmônica (IEEE Std., 2011). Dentre as estratégias de amortecimento ativo, destacam-se tanto as baseadas no domínio da frequência quanto as baseadas no domínio do tempo, como, por exemplo, os controladores por realimentação de estados (BLAABJERG et al., 2006; LISERRE et al., 2006; MACCARI, 2014; LIU, 2018). Um ponto comum ao projeto de controladores nesta aplicação é a necessidade de levar em consideração um compromisso adequado entre respostas transitórias rápidas, baixa distorção das correntes de rede em regime permanente, e um sinal de controle com limitações.

O algoritmo de otimização por enxame de partículas (do inglês, *Particle swarm optimization* - PSO), proposto em Eberhart e Kennedy (1995), é um exemplo de metaheurística utilizada em problemas de engenharia. Trata-se de um algoritmo simples comparado a outros algoritmos bio-inspirados, como algoritmos genéticos, por exemplo, modelando um sistema como uma população auto-organizada de indivíduos autônomos que interagem entre si e com seu ambiente (FLASÍNSKI, 2016). Sobre aplicações em conversores de potência, em Veerachary e Saxena (2015), utiliza-se o PSO para otimizar componentes do estágio de potência de um conversor CC-CC de quarta ordem. Em da Silva et al. (2016), é ilustrada a eficiência do PSO para o controle de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede. Já em Altinoz e Erdem (2010) e Emami et al. (2008), utiliza-se o PSO para otimizar parâmetros de um controlador proporcional integral derivativo (PID) para conversores *Buck*, e em Banerjee et al. (2017) na otimização para um conversor *Boost* intercalado com controlador Tipo-III ideal. Nota-se que a utilização do algoritmo PSO para o projeto de controladores robustos aplicados especificamente a inversores conectados à rede é um ponto que merece maior investigação.

O presente trabalho apresenta a utilização do algoritmo PSO para obtenção de controladores por realimentação de estados para uma aplicação em conversores conectados por meio de filtro LCL. A incerteza na indutância de rede, o atraso de implementação digital do sinal de controle e controladores ressonantes de dimensão arbitrária são levados em conta no projeto. Em um estudo de caso, que inclui simulações em tempo real, mostra-se que os ganhos de controle fornecidos pelo PSO garantem a estabilidade robusta e bom desempenho em termos de rastreamento de

referências senoidais frente a incertezas paramétricas, provendo correntes de rede em conformidade com os limites prescritos pela norma IEEE 1547 (IEEE Std., 2011).

## 2 | MODELAGEM

Considere o inversor conectado à rede por meio do filtro LCL, mostrado na Figura 1.

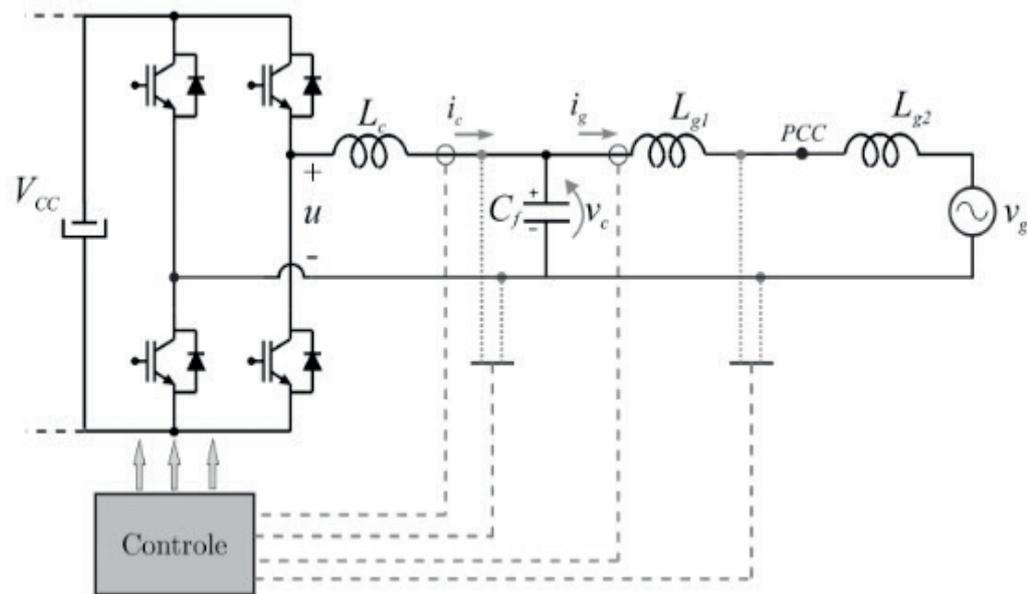


Figura 1. Inversor monofásico conectado à rede por meio de um filtro LCL.

Note que a rede neste caso é predominantemente indutiva. A indutância da rede,  $L_{g2}$ , é suposta incerta e pertencente a um intervalo real  $\mathcal{P}$  cujos extremos são conhecidos, representando a operação desde uma condição de impedância máxima até uma condição de impedância mínima.

No domínio do tempo contínuo, a planta da Figura 1 pode ser modelada no espaço de estados como

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_c x + B_{uc} u + B_{wc} v_g \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

em que  $x$  representa o vetor de estados,  $u$  representa o sinal de controle,  $v_g$  representa um distúrbio (tensão de rede),  $y$  é a saída a ser controlada (corrente de rede) e as demais matrizes são dadas por

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_c} & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & \frac{1}{L_{g1} + L_{g2}} & 0 \end{bmatrix}, B_{uc} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_{wc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_{g1} + L_{g2}} \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 1], x = \begin{bmatrix} i_c \\ v_c \\ i_g \end{bmatrix}$$

Objetivando a aplicação de uma técnica de controle digital, pode-se escrever um modelo discretizado da planta como (ÂSTRÖM, WITTENMARK, 2013)

$$\begin{aligned} x(n+1) &= Ax(n) + B_u u(n) + B_w v_g(n) \\ y(n) &= Cx(n) \end{aligned}$$

sendo que, para um período de discretização  $T_s$  suficientemente pequeno, as matrizes discretas podem ser representadas por

$$A = I + A_c T_s, \quad B_u = B_{uc} T_s, \quad B_w = B_{wc} T_s \quad (2)$$

Adicionalmente, para a implementação do controle em um processador digital de sinais e para garantir rastreamento de referências senoidais, com rejeição de distúrbios com harmônicas, utilizam-se, respectivamente, um atraso na ação de controle e controladores ressonantes de dimensão arbitrária, levando à descrição (MACCARI et al., 2014)

$$x(n+1) = Ax(n) + B_u \phi(n) + B_w v_g(n) \quad (3)$$

$$\phi(n+1) = u(n) \quad (4)$$

$$\xi(n+1) = R\xi(n) + T(i_{ref}(n) - Cx(n)) \quad (5)$$

em que  $\phi$  representa o sinal de controle implementado com atraso,  $i_{ref}$  é a referência para a corrente de rede,  $\xi$ ,  $T$  e  $R$  representam, respectivamente, os estados internos e as matrizes dos controladores ressonantes.

O sistema aumentado (3)-(5) pode ser escrito como

$$\begin{bmatrix} x(n+1) \\ \phi(n+1) \\ \xi(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -TC & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ \phi(n) \\ \xi(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(n) + \begin{bmatrix} B_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g(n) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} i_{ref}(n) \quad (6)$$

$$y(n) = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ \phi(n) \\ \xi(n) \end{bmatrix}$$

ou, de forma mais compacta, como

$$\begin{aligned} \rho(n+1) &= A_{aum}\rho(n) + B_{uum}u(n) + B_{gaum}v_g(n) + B_{raum}i_{ref}(n) \\ y(n) &= C_{aum}\rho(n) \end{aligned} \quad (7)$$

A lei de controle por realimentação de estados a ser utilizada é dada por

$$u(n) = K\rho(n) \quad (8)$$

Para um estudo de caso, são considerados os parâmetros da planta vistos na Tabela 1 (MACCARI et al., 2014).

Parâmetros	Valores
$L_c$	1 mH
$C_f$	62 $\mu$ F
$L_{g1}$	0,3 mH
$L_{g2}$	[0, 1] mH
Tensão do barramento	400 V
Tensão de rede	180 V(pico); 60 Hz
Frequência de amostragem	20040 Hz
Frequência de comutação	10020 Hz
Frequência dos ressonantes	60, 180, 300, 420 Hz
Fator de amortecimento dos ressonantes	0,0001

Tabela 1. Parâmetros da planta.

Note que serão utilizados 4 controladores ressonantes, o que leva a um vetor com 8 estados que, agregados aos 3 estados do filtro,  $x$ , e ao estado referente ao atraso,  $\phi$ , resulta em um ganho de controle com 12 elementos, dado por

$$K = [ k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{12} ] \quad (9)$$

Neste sentido, o problema a ser resolvido é a busca dos elementos do vetor de ganhos de controle em um espaço de busca dado pelo produto cartesiano dos intervalos  $k_{i_{\min}} \leq k_i \leq k_{i_{\max}}$ ,  $i=1, \dots, 12$ . A próxima seção traz uma solução para este

problema utilizando um algoritmo PSO.

### 3 | OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

PSO é um algoritmo de otimização baseado em padrões de enxame observados na natureza. Conforme descrito em Eberhart e Kennedy (1995), no algoritmo PSO, um conjunto de partículas  $i$  é chamado de enxame, sendo  $s_i$  um vetor que descreve a posição de cada partícula deste enxame. Cada partícula utiliza uma equação de velocidade  $v_i$  para atualizar sua posição e deslocar-se no espaço de busca no decorrer das épocas  $m$ . As equações do algoritmo podem ser escritas como

$$s_i(m+1) = s_i(m) + v_i(m+1) \quad (10)$$

$$v_i(m+1) = \omega v_i(m) + \gamma_1 r_1 (P_{i,best} - s_i(m)) + \gamma_2 r_2 (G_{best} - s_i(m)) \quad (11)$$

em que  $\omega$  é o fator de inércia,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são os coeficientes cognitivo e social, respectivamente, e  $r_1$  e  $r_2$  são números randômicos entre [0,1] para gerar um comportamento aleatório para as partículas.

O algoritmo armazena a posição que resultou o melhor valor da função objetivo que cada partícula já obteve, denominado de  $P_{i,best}$  e a posição que resultou o melhor valor da função objetivo entre todas as partículas do enxame, denominado de  $G_{best}$ .

O fluxo de execução do algoritmo PSO utilizado é descrito a seguir:

- 1) Inicializar aleatoriamente a posição das partículas do enxame dentro dos limites do espaço de busca definido.
- 2) Calcular a função objetivo de cada partícula.
- 3) Atualizar de cada partícula e do enxame.
- 4) Atualizar posição e velocidade das partículas utilizando (10) e (11).
- 5) Se o critério de parada for atingido, então fornecer a solução do problema de otimização () e finalizar a execução. Se não, retornar para 2).

#### 3.1 Obtenção dos ganhos de controle para o estudo de caso

A lei de controle em (8) pode ser reescrita como

$$u(n) = K\rho(n) = \begin{bmatrix} K_x & K_\phi & K_\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ \phi(n) \\ \xi(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

A Figura 2 mostra uma representação do sistema em malha fechada com a lei de controle (12).

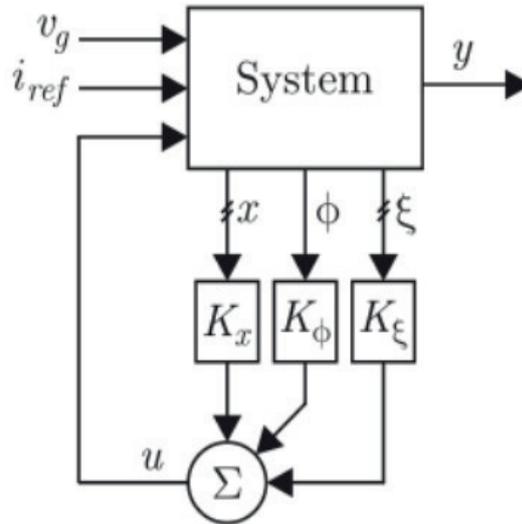


Figura 2. Diagrama de blocos evidenciando as entradas, saída e estados do sistema em malha fechada.

Aqui, tem-se como objetivo computar, off-line, o ganho fixo de controle,  $K = [K_x \ K_\phi \ K_\xi]$ , de forma a garantir estabilidade frente à incertezas em  $L_{g2} \in \mathcal{P}$ .

A função objetivo é definida por

$$\sigma(K) = \max_{L_{g2} \in \mathcal{P}} \left| \lambda \left( A_{uum}(L_{g2}) + B_{uum}K \right) \right| \quad (13)$$

que provê o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada.

A partir desta função objetivo, o projeto do controlador pode então ser resolvido por meio de um problema de otimização dado por

$$\min(\sigma(K)) \text{ s.a } K \in \mathcal{K} \quad (14)$$

em que  $\mathcal{K}$  é o espaço de busca restrito do controlador, definido como um hiper-retângulo em torno dos ganhos de um DLQR convencional, projetado para o ponto médio de  $L_{g2}$ .

O PSO foi inicializado com coeficientes cognitivos e sociais de 0,5, com número de partículas igual a 50 e número de épocas igual a 100, provendo boa convergência do algoritmo para a solução.

Ao final da execução, tem-se que a melhor partícula do enxame, que representa o ganho de controle  $K$ , é dada por

$$\sigma(K) = 0,9936$$

$$K' = \begin{bmatrix} -13,16108928784157 \\ -4,324263420719069 \\ -3,219230732731759 \\ -0,755616250730909 \\ 57,02697975531543 \\ -56,58227640999129 \\ 26,91066587139294 \\ -26,733811176937127 \\ 17,789789865190922 \\ -19,141330280468985 \\ 23,2316887459548 \\ -26,348007937950975 \end{bmatrix}$$

(105)

Para comprovar a viabilidade do ganho de controle em (15), simulações baseadas nos modelos matemáticos da Seção 2 e resultados baseados em um simulador operando em tempo real são apresentados a seguir.

#### 4 | RESULTADOS

Inicialmente, para comprovar a robustez contra incerteza no parâmetro de indutância de rede, é feita a análise dos autovalores do sistema em malha fechada (ÂSTRÖM, WITTENMARK, 2013), mostrados na Figura 3.

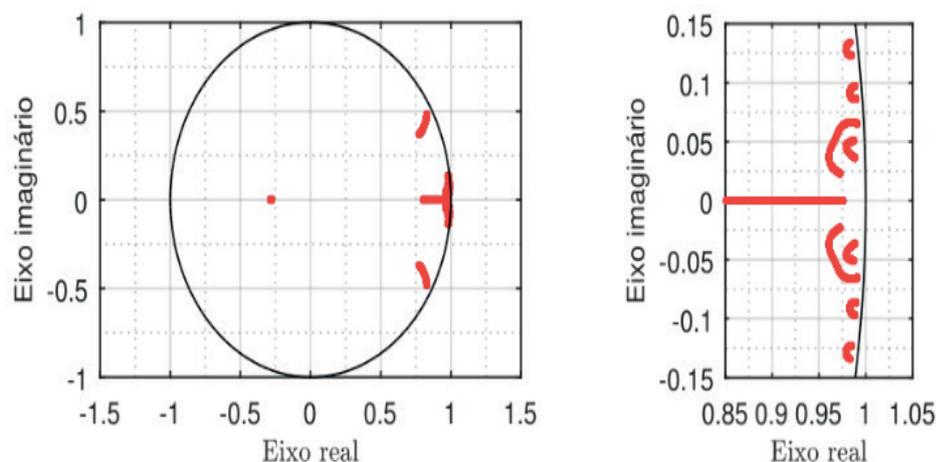


Figura 3. Autovalores do sistema em malha fechada para  $L_{g2min} \leq L_{g2} \leq L_{g2max}$  (à esquerda) e detalhamento dos autovalores mais próximos da borda do círculo de raio unitário (à direita).

Nota-se que todos os autovalores estão alocados no círculo de raio unitário, confirmando a estabilidade do sistema de malha fechada para toda a faixa de incerteza paramétrica. Além disso, os autovalores obedecem à restrição de raio menor que  $\sigma$ , dada em (15).

Após, verificou-se o comportamento no domínio do tempo do sistema em malha fechada considerando o intervalo de incerteza paramétrica da indutância da rede. Para avaliar as respostas transitórias e o rastreamento de referência em regime permanente, foram realizadas simulações do sistema em malha fechada com uma referência senoidal de 60 Hz e com amplitude de 10 A. O primeiro ensaio inclui a situação de rede com indutância mínima ( $L_{g2min}$ ), conforme mostrado na Figura 4.

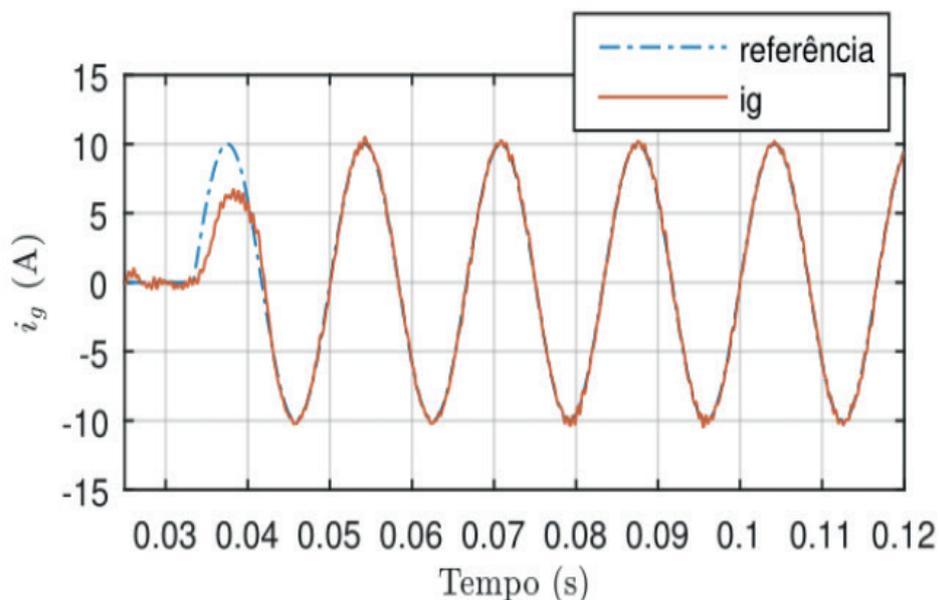


Figura 4. Simulação do sistema em malha fechada resultando na corrente  $i_g$  para  $L_{g2min}$ , com referência senoidal de 60 Hz e com amplitude de 10 A.

Nota-se que o sistema em malha fechada com os ganhos de controle em (15) apresenta rastreamento de referência adequado, em regime permanente e no transitório, com acomodação em menos de um ciclo da rede.

Um ensaio similar ao anterior, com rede operando com indutância máxima,  $L_{g2max}$ , foi realizado, provendo os resultados na Figura 5. Do mesmo modo que o ensaio para  $L_{g2min}$ , são obtidas boas respostas transitórias e em regime permanente, novamente com acomodação em menos de um ciclo da rede.

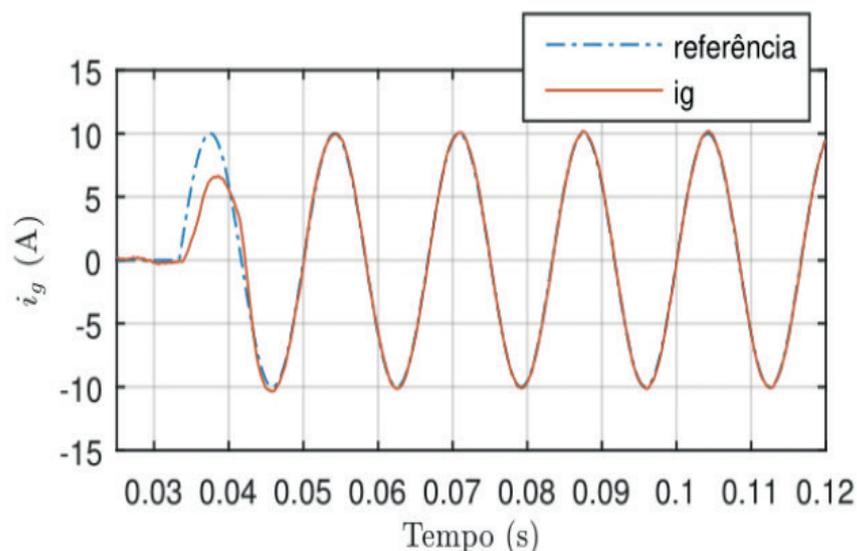


Figura 5. Simulação do sistema em malha fechada resultando na corrente  $i_g$  para  $L_{g2max}$ , com referência senoidal de 60 Hz e com amplitude de 10 A.

Uma análise da qualidade da corrente de rede foi feita por meio da distorção harmônica total (do inglês, *Total harmonic distortion* - THD). O valor de THD foi, para o pior caso (ensaio com  $L_{g2min}$ ), de 2,38%, obedecendo ao limite prescrito pela norma IEEE 1547.

O desempenho satisfatório, apresentado nas Figuras 4 e 5, pode ser confirmado por meio da análise feita no domínio da frequência, na Figura 6, que mostra os diagramas de Bode do sistema em malha fechada da entrada  $i_{ref}$  para a saída  $i_g$ , para operação com  $L_{g2min}$  e com  $L_{g2max}$ . É possível observar um ganho de 0 dB e fase equivalente a  $0^\circ$  na frequência de 60 Hz, corroborando um bom rastreamento de referências senoidais nesta frequência.

Para confirmar a viabilidade do controlador projetado em uma condição muito próxima à da prática, a topologia apresentada na Figura 1 foi simulada em tempo real usando *Hardware-in-the-loop* (HIL) modelo 402, do fabricante Typhoon HIL (MAJSTOROVIC et al., 2011). O controlador foi implementado digitalmente usando um DSP Texas TMS32F28335. Para capturar os resultados, foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo MDO 4054-3, sendo a interface entre DSP, osciloscópio e HIL realizada pela placa *ugrid* 2.0.

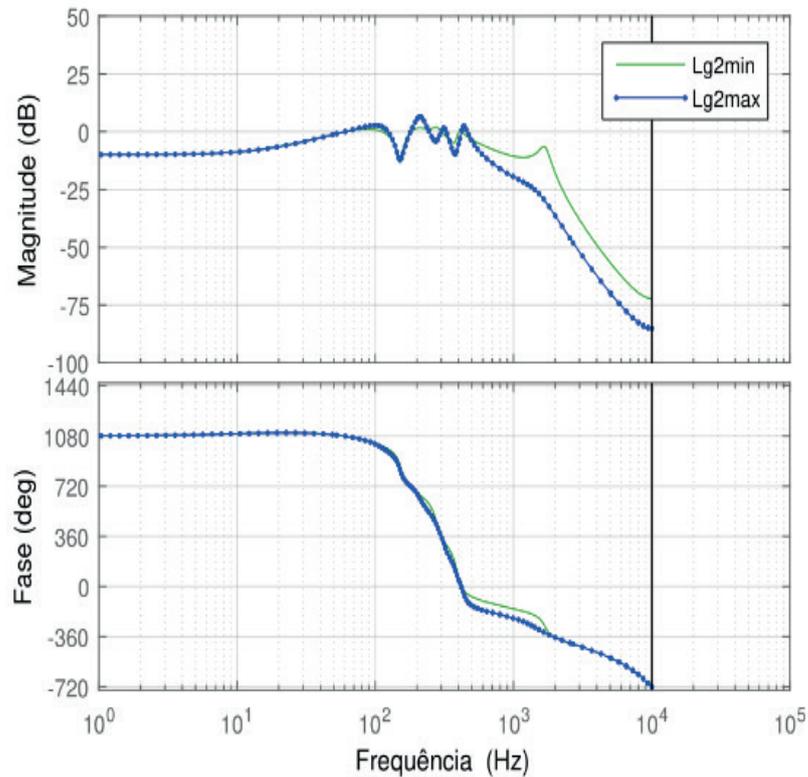


Figura 6. Diagramas de Bode do sistema em malha fechada tendo como entrada  $i_{ref}$  e como saída  $i_g$ , para indutâncias de rede  $L_{g2min}$  e  $L_{g2max}$ .

A Figura 7 mostra o transitório de partida do sistema em malha fechada, com uma referência senoidal em 60 Hz e 20 A de amplitude, para operação com indutância de rede dada por  $L_{g2max}$ . Nota-se o bom desempenho do sistema, com acomodação aproximadamente em um ciclo de rede, demonstrando boa correspondência com o resultado de simulação apresentado na Figura 5.

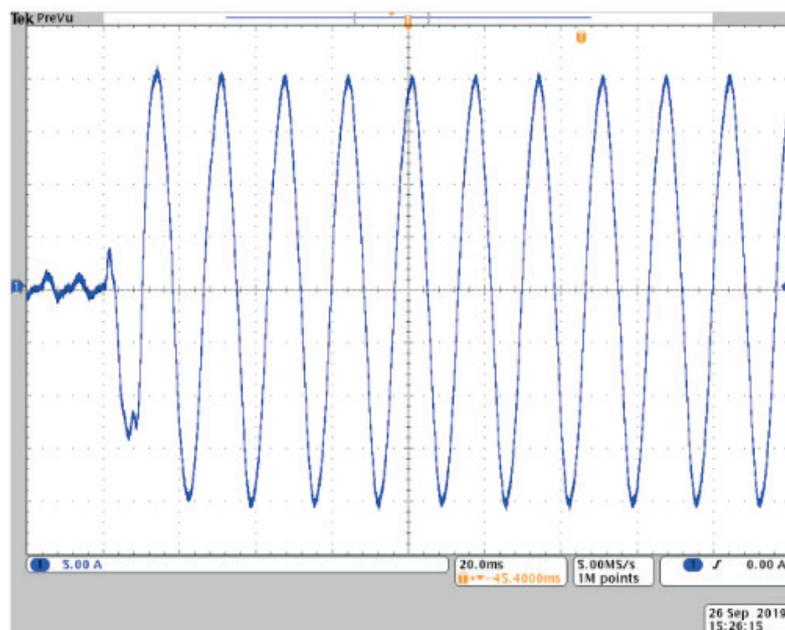


Figura 7. Resultado obtido com simulação utilizando HIL, mostrando o transitório de partida da corrente injetada na rede, para operação com indutância de rede igual a , e uma referência senoidal em 60 Hz e com 20 A de amplitude.

A Figura 8 apresenta um detalhamento, do regime permanente da corrente mostrada na Figura 7. A análise harmônica da forma de onda na Figura 8 indica uma THD de 3,02%. Uma análise das harmônicas individuais desta forma de onda permite concluir que as mesmas também estão em conformidade com os limites prescritos pela norma IEEE 1547 para harmônicas pares e ímpares, confirmando a boa qualidade dos resultados.

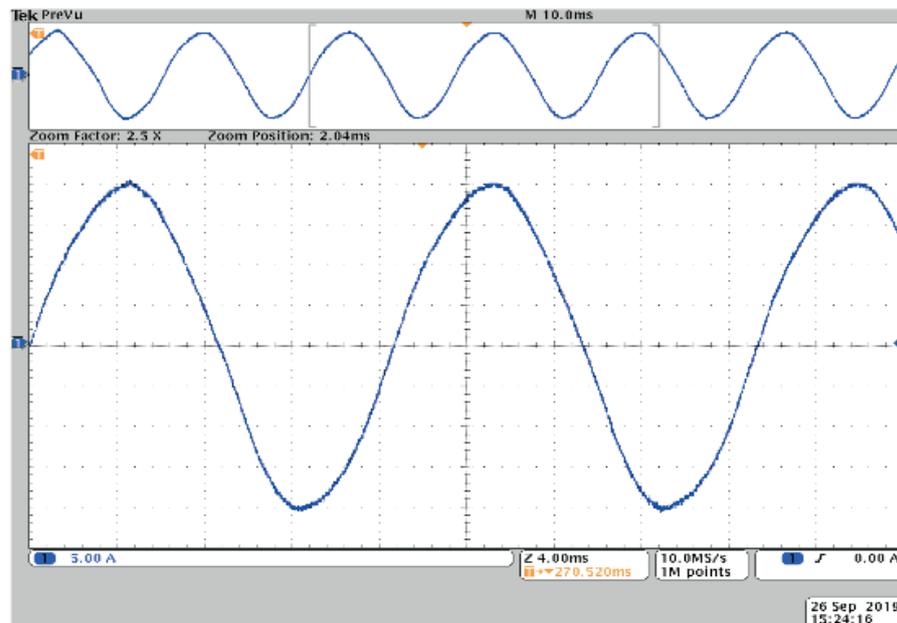


Figura 8. Resultado obtido com simulação utilizando HIL, mostrando detalhamento do regime permanente da forma de onda apresentada na Figura 7.

## 5 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto de ganhos de controle por realimentação de estados por meio de um algoritmo PSO, com aplicação a inversores monofásicos conectados à rede. A otimização do controlador é baseada na minimização do máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada sujeito a incertezas paramétricas na indutância de rede. O sistema em malha fechada operando com o controlador proposto, apresenta robustez contra incertezas paramétricas e boas respostas transitórias e em regime permanente, inclusive em simulações em tempo real. A análise das correntes injetadas na rede confirmam THD e harmônicas individuais compatíveis com os limites da norma IEEE 1547, indicando a viabilidade do controlador para esta aplicação.

## 6 | AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os

autores também gostariam de agradecer ao INCT-GD e às agências de fomento CNPq, CAPES e FAPERGS (CNPq 465640/2014-1, CNPq Projeto 309536/2018-9, CAPES 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS

ALTINOZ, O.; ERDEM, H., **Evaluation function comparison of particle swarm optimization for buck converter**, in Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on. IEEE, 2010, pp. 798–802.

ÂSTROM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-controlled systems: theory and design*. Coureier Corporation, 2013.

BANERJEE, S.; GHOSH, A.; RANA, N., **An improved interleaved boost converter with PSO-based optimal type-III controller**, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 323–337, 2017.

BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; TIMBUS A., **Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, 2006.

DA SILVA, S. A. O.; SAMPAIO, L. P.; DE OLIVEIRA, F. M.; DURAND, F. R., **Feed-forward DC-bus control loop applied to a single-phase grid-connected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning**, IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 1, pp. 183–193, 2016.

EBERHART, R.; KENNEDY, J., **A new optimizer using particle swarm theory**, in Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on. IEEE, 1995, pp. 39–43.

EMAMI, S.; POUDEH, M. B.; ESHTEHARDIHA, S., **Particle swarm optimization for improved performance of PID controller on buck converter**, in Mechatronics and Automation, 2008. ICMA 2008. IEEE International Conference on. IEEE, 2008, pp. 520–524.

ERICKSON, R. W., **Fundamentals of Power Electronics**. New York, NY: Chapman & Hall, 1997.

FLASÍNSKI, M., **Introduction to artificial intelligence**. Springer, 2016.

IEEE, **IEEE:1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems**, 2011.

KJAER, S.; PEDERSEN, J.; BLAABJERG, F., **A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules**, Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, 2005.

LISERRE, M.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F., **Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 836–841, 2006.

LIU, B.; WEI, Q.; ZOU, C.; DUAN S., **Stability analysis of LCL-type grid-connected inverter under single-loop inverter-side current control with capacitor voltage feedforward**, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, pp. 691–702, 2018.

MACCARI JR., L. A.; MASSING, J. R.; SCHUCH, L.; RECH, C.; PINHEIRO, H.; OLIVEIRA, R. C. L. F.; MONTAGNER, V. F., **LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under**

**uncertain parameters**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 7, pp. 3776–3785, 2014.

MAJSTOROVIC, D.; CELANOVIC, I.; TESLIC, N. D.; CELANOVIC, N.; KATIC, V. A., **Ultralow-latency hardware-in-the-loop platform for rapid validation of power electronics designs**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4708-4716, 2011.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P., **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**, ser. Wiley - IEEE. John Wiley & Sons, 2011.

VEERACHARY, M.; SAXENA, A. R., **Optimized power stage design of low source current ripple fourth-order boost DC–DC converter: A PSO approach**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1491–1502, 2015.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

AIS 10, 13  
Ajustes de proteção 22, 28, 34, 103  
Alocação de Recursos 161  
Anarede 48, 49, 52, 54, 60  
Anuidades 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20

### B

BAR 10, 225  
Biodiesel 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47  
BRR 10

### C

CAIMI 10, 12, 13, 15, 19  
Capacidade Instalada 1, 2, 3, 8  
Célula combustível 190, 191, 192, 196  
Cenário Energético 1  
Chave fusível 96, 98, 110, 114  
Chaves Automáticas 161, 162, 163, 164, 167, 168, 171  
Comunidades isoladas 36, 38  
Confiabilidade 20, 22, 24, 27, 49, 50, 53, 60, 84, 90, 121, 130, 136, 139, 145, 161, 162, 163, 165, 166, 167, 171, 172, 174, 192, 243  
Continuidade do Fornecimento 108, 163  
Conversor Boost 190  
Conversores 147, 148, 175, 176, 190, 191, 192, 201, 203, 204, 209, 248, 249, 252, 258, 259, 260  
Conversores conectados à rede 147  
Custo operacional 15, 96, 102

### D

DEC 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 105, 106, 107, 111, 119, 164, 171  
Densidade de Corrente 193, 196, 197, 198, 200, 201, 203, 205, 211, 213, 214, 248, 252, 256  
Descargas atmosféricas 89, 90, 92, 93, 94  
Desgaste de Contatos 128, 131

### E

Energia Solar Fotovoltaica 1, 2, 3, 6, 7, 8, 61

### F

Filtro LCL 147, 148, 149  
Fluxo de Potência 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 148  
Frequência 90, 97, 140, 147, 148, 151, 156, 163, 164, 175, 176, 177, 178, 181, 184, 185, 187, 191, 193, 196, 200, 201, 203, 204, 205, 207, 208, 209, 212, 216, 250, 251, 252, 260

## G

Geração de energia 3, 36, 38, 43, 45, 46, 263

Geração Distribuída 2, 3, 4, 6, 9, 61, 62, 64, 65, 72, 73, 161, 162, 167, 172

## I

Ilhamento de Geração Distribuída 161

Indicadores de Qualidade de Serviço 108, 118

Índices operacionais 89, 94

Interrupções 89, 90, 91, 92, 93, 94, 105, 106, 108, 118, 120, 134, 135, 163

Isolamento 124, 130, 139, 144, 164, 206, 207, 235, 238, 245

## M

Manutenção Preditiva 128, 129, 136

Monitoramento de Disjuntor 128

Monitoramento Digital 108

Monitoramento On-line 128, 129

## N

NERC PRC-027-1 21, 22

Núcleos Magnéticos 203, 252, 253, 257

## O

Otimização por enxame de partículas 147, 148, 152

## P

Perdas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 142, 146, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 249, 250, 251, 252, 254, 255, 256, 257, 258

Perdas Técnicas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 58, 60

Proteção de Sistemas Elétricos 21, 22

PSS Sincal 21, 22, 30, 31, 32, 35

## Q

Qualidade de Energia 96, 97, 107, 108, 109, 121

## R

Religador monofásico 96, 98, 99, 105

Rendimento 142, 143, 145, 176, 184, 186, 187, 190, 192, 193, 199, 200, 201, 248, 249, 252, 259

Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012 61

## S

Siguard PSA 21, 22, 30, 31, 33

## T

Tecnologia PRE 89

Transformador a óleo 139, 141, 145

Transistores de potência 175, 177

## V

Vísceras de peixes 36, 43, 46

Volume 43, 57, 141, 188, 191, 193, 196, 199, 202, 203, 204, 207, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 228, 250

