

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

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

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

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

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

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

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-133-3

DOI 10.22533/at.ed.333211706

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

APRESENTAÇÃO

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

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

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

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

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

Joelson Lopes da Paixão
Mauro Fonseca Rodrigues
José Oizimas Junior

DOI 10.22533/at.ed.3332117061

CAPÍTULO 2..... 15

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117062

CAPÍTULO 3..... 29

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117063

CAPÍTULO 4..... 41

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117064

CAPÍTULO 5..... 55

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

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117065

CAPÍTULO 6..... 69

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117066

CAPÍTULO 7..... 82

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

Carollina Silva de Santana
Armando Hirohumi Tanimoto

DOI 10.22533/at.ed.3332117067

CAPÍTULO 8..... 91

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117068

CAPÍTULO 9..... 109

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

Lucas Luiz Lunarti
Maury Meirelles Gouvêa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117069

CAPÍTULO 10..... 117

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

Vinicius Pedroza Delsin
Antonio Newton Licciardi Junior

DOI 10.22533/at.ed.33321170610

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

CAPÍTULO 1

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

Data de aceite: 01/06/2021

Joelson Lopes da Paixão

Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS

Mauro Fonseca Rodrigues

Doutor em Engenharia Elétrica
Unipampa - Campus Alegrete
Alegrete - RS

José Oizimas Junior

Engenheiro Eletricista
Departamento Municipal de Energia de Ijuí -
DEMEI
Ijuí - RS

RESUMO: A integração crescente das fontes alternativas, sobretudo com pequenos aproveitamentos de energia no sistema elétrico brasileiro torna o estudo de sincronismo importante para manter a estabilidade do mesmo. Sistemas com sincronismos diversos podem acarretar em perdas e funcionamento descontínuo, impossibilitando a previsão do equilíbrio geração-consumo, tão importante na integração atual das redes de eletricidade. Com o incentivo e crescente aumento de micro e minigeradores de energia, principalmente após a Resolução 687, em 2015, da ANEEL, aumentou-se a probabilidade de pequenas fontes hidráulicas também serem inseridas. Assim, o objetivo deste artigo é estudar as técnicas de sincronismo a partir da ferramenta Phase Locked Loop (PLL), aplicando-a numa pequena central hidrelétrica.

Primeiramente, será apresentada a teoria base das Transformadas de Clarke e Park. Após será proposto um algoritmo de sincronismo, simulado em ambiente computacional, Simulink, para verificar a possibilidade de sincronização do sistema hidráulico à rede elétrica e as condições para se manter sincronizado.

PALAVRAS-CHAVE: Sincronização de geração distribuída, Método PLL, Simulações de sincronismo, Transformadas de Clarke e Park.

ABSTRACT: The growing integration of alternative sources, especially with small uses of energy in the Brazilian electrical system, makes the study of synchronism important to maintain its stability. Systems with different synchronisms can lead to losses and discontinuous operation, making it impossible to forecast the generation-consumption balance, which is so important in the current integration of electricity networks. With the incentive and growing increase of micro and mini-generators of energy, mainly after Resolution 687, in 2015, of ANEEL, the probability of small hydraulic sources also being inserted increased. Thus, the objective of this article is to study the synchronism techniques from the Phase Locked Loop (PLL) tool, applying it in a small hydroelectric power station. First, the basic theory of the Transformations of Clarke and Park will be presented. Afterwards, a synchronization algorithm, simulated in a computational environment, Simulink, will be proposed to verify the possibility of synchronizing the hydraulic system to the power grid and the conditions to remain synchronized.

KEYWORDS: Synchronization of distributed

generation, PLL Method, Simulations of synchronism, Transformations of Clarke and Park.

1 | INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, a energia elétrica deixou de apenas proporcionar conforto e comodidade e passou a ser um produto essencial para o funcionamento e desenvolvimento de todos os setores. Todo o desenvolvimento, expansão e modernização do país está diretamente vinculado e dependente do setor elétrico. A eletricidade é fundamental para a manutenção das atividades produtivas, além de ser indispensável para a geração de renda e fortalecimento da economia [1].

Desde as primeiras descobertas a respeito da eletricidade e tentativas de domínio da mesma, trabalhou-se para avançar em termos de geração e distribuição da energia elétrica. Todo o esforço e estudo empregado mostra, atualmente, como resultado, um mundo altamente conectado. Em que praticamente todos os países possuem sistemas elétricos capazes de transportar a energia gerada e distribuí-la para os consumidores em qualquer ponto, ou nos centros de carga.

No Brasil, assim como em muitos outros países, o sistema elétrico, se desenvolveu de modo unilateral. Isto é, com centros geradores, linhas de transmissão e redes de distribuição. Nesta topologia de sistema, toda a energia é gerada em usinas (sejam elas hidrelétricas, termelétricas, nucleares, etc) e transportada até os centros de consumo através de linhas de transmissão. Este sistema está consolidado e, até então, funciona muito bem. No entanto, os meios de geração, assim como as diretrizes relacionadas à geração vêm evoluindo a nível mundial, e este cenário começa a passar por profundas modificações.

Muitas das usinas que compõem o sistema elétrico atual, têm sua matriz baseada em combustíveis fósseis. Devido a problemas como aquecimento global, altos índices de emissão de gases nocivos à saúde e à atmosfera, possível esgotamento destas matrizes, entre outros; faz com que os líderes das nações aprovem políticas voltadas à substituição gradual das fontes de geração poluentes e/ou não-renováveis. Estas novas práticas, estão relacionadas a uma maior diversidade de fontes geradoras, processos de descentralização da geração, inserção massivas de fontes renováveis e sustentáveis, etc. A evolução destes processos associada ao conceito de redes inteligentes, permite vislumbrar um sistema elétrico moderno, com mínimo impacto ambiental, maior maleabilidade, altos índices de autogeração, maior confiabilidade, segurança e operabilidade.

Neste novo sistema, será muito comum a presença de geração distribuída. Seja esta no formato de usinas eólicas, fotovoltaicas, de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, entre outras. Assim, nesse trabalho objetiva-se a implementação teórica do processo de sincronização de um gerador hidráulico com o sistema elétrico. Para a sincronização de máquinas, existem muitas técnicas conhecidas e bastante difundidas. No entanto, aqui

procura-se abordar uma nova técnica de sincronização através do conceito de *Phase Locked Loop* (PLL), ou Malha Travada em Fase.

A partir deste conceito, procura-se colocar em fase o gerador hidráulico com o sistema elétrico. Quando os dois estiverem com as fases casadas, o PLL faz o travamento do laço, mantendo o novo sistema (gerador + rede elétrica) sincronamente acoplados. O laço ou malha após travado em fase, faz com que o sistema se mantenha sincronizado [1].

O restante do artigo está estruturado como segue. A Seção II apresenta um referencial teórico a cerca das transformadas de Clarke e Park [2], necessárias para a implementação do estudo. A Seção III apresenta a proposta de PLL empregada, com apoio do Simulink [3], para simulação e testes objetivados neste trabalho. Posteriormente, na Seção IV são apresentados os resultados obtido, bem como a discussão dos mesmos. E por fim, a Seção V apresenta as considerações finais do trabalho realizado.

2 | TRANSFORMADAS DE CLARKE E PARK

As transformadas de Clarke e Park permitem a transformação de um sistema trifásico, desequilibrado ou não, em um sistema bifásico. O conhecimento e uso destas transformadas são necessários para a aplicação do PLL.

A) Transformada de Clarke

A transformada de Clarke, consiste na transformação de um sistema trifásico, girante no tempo, abc , em um sistema bifásico, estacionário, $\alpha\beta$. Ainda se houver desbalanço nas fases, deve-se usar o V_o para a fase a . A coordenada α é geralmente travada para a fase a , enquanto que a coordenada β é defasada de 90° em relação a coordenada α . Assim, na transformação os eixos abc são transformados em eixos $\alpha\beta$, conforme mostrado na Figura 1.

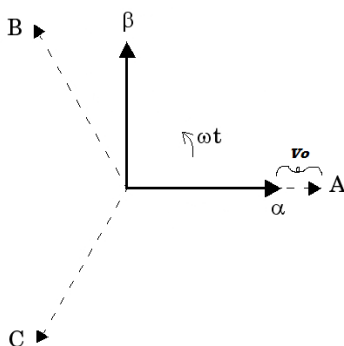


Figura 1: Transformada de Clarke [2] [4].

Na formulação das equações de transformação, considera-se que: $V_a = V_m \sin(\omega t)$;

$$V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); V_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}); V_m = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{line}; V_{line} = \sqrt{3} V_a \text{ e } V_a = V_m / \sqrt{2}.$$

Observando a Figura 1, pode-se formular as seguintes equações:

$$V_a = V_\alpha + V_o \quad (1)$$

$$V_b = -V_\alpha \cos 60^\circ + V_\beta \cos 30^\circ + V_o \quad (2)$$

$$V_c = -V_\alpha \cos 60^\circ - V_\beta \cos 30^\circ + V_o \quad (3)$$

$$V_a + V_b + V_c = 3V_o \quad (4)$$

Ou então, reescrevendo as equações (1, 2, 3 e 4) na forma matricial, chega-se a:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

Fazendo a inversa da matriz (5), obtém-se a matriz (6):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_m \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

B) Transformada de Park

A transformada de Park ou de Blondel corresponde na transformação de um sistema trifásico abc , em dois eixos rotativos dq (direto e em quadratura). De modo que, a coordenada d gira por um ângulo θ , em relação a uma das fases do sistema abc que, em geral, é a fase a . A coordenada q é defasada de 90° em relação a coordenada d . Na Figura 2, são mostrado os eixos dq e $\alpha\beta$ no mesmo plano.

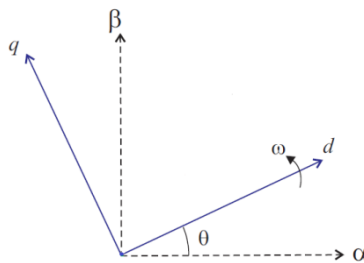


Figura 2: Transformada de Park [2] [4].

Na forma matricial, pode-se relacionar a Transformada de Clarke com a de Park da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fazendo a inversa da matriz (7), obtém-se a matriz (8):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

C) Princípio de operação do PLL

Existem vários tipos de PLL, de acordo com a forma de implementação, pode ser dividido em *hardware* PLL e *software* PLL. Por aplicações pode ser dividido em PLL trifásico e PLL monofásico. E quanto à estrutura de controle pode ser classificado em PLL de malha aberta e PLL de malha fechada [5].

Em teoria, o algoritmo PLL proporciona o travamento de um sinal externo (U), em fase, com um sinal de referência (U_{PLL}). A ideia para sincronizar o sinal externo (correspondente a uma GD) com o sinal de referência (correspondente à rede elétrica) é de que quando ambos sinais estiverem em fase, ou então, com uma pequena diferença angular entre eles, o vetor girante da GD (U) se projete sobre o vetor da rede (U_{PLL}). Através da Transformada de Park, obtém-se as tensões de eixo direto e em quadratura de ambos os sinais. Para que estes sinais estejam em fase e, conseqüentemente, sincronizados, a diferença entre os ângulos do PLL e do sinal externo deve ser zero. Isto é, $\theta \approx \theta'$. Quando isto ocorre, a projeção da tensão de quadratura do sinal externo tende a zero, e a tensão de eixo direto do U_{PLL} (rede) e do sinal externo (GD) são iguais [5]. A representação gráfica deste processo é explicitada na Figura 3.

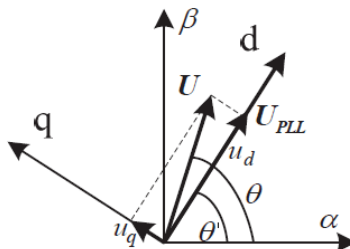


Figura 3: Diagrama do princípio de operação do PLL [5].

Na forma de equações, o processo de sincronização pode expresso como segue. Adotando $\phi = \theta - \theta'$, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \\ \Delta V_o \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta') \\ \sin(\theta - \theta') \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Quando a diferença entre o ângulo do PLL e da GD (ϕ) é pequena ou próxima de zero, tem-se que $\sin(\theta - \theta') \approx (\theta - \theta')$, sendo os ângulos expressos em radianos. Portanto, pode-se afirmar que, para um sistema trifásico equilibrado, quando o PLL está travado/sincronizado a componente de eixo em quadratura se reduz a zero ($\sin(0) = 0$); e a componente do eixo direto vai a um ($\cos(0) = 1$). Enquanto os sistemas não estão sincronizados ou há uma pequena defasagem, a componente de eixo em quadratura da GD é linearmente proporcional ao erro (diferença de fases) [5]. De modo que: $\Delta V_q = \sqrt{2/3} V_{line}(\theta - \theta') = V_m(\theta - \theta')$.

3 I PROPOSTA DE TOPOLOGIA PLL PARA A SINCRONIZAÇÃO

O objetivo do controle do PLL é fazer com que as tensões da rede e da GD entrem em fase, para que os sistemas possam então ser interconectados. A topologia de controle escolhida, e que deve ser aplicada no algoritmo PLL, visa anular a diferença entre as tensões de eixo direto da rede (U_d^*) e da GD (U_d) [6]. Na Figura 4 é apresentada a estrutura de controle proposta.

Para realizar o sincronismo de uma Geração Distribuída (GD) [7], nesse caso específico hidráulica com acoplamento óptico, a topologia foi simulada no ambiente Matlab de forma a criar uma estrutura capaz de antecipar possíveis problemas de implementação e permitir, posteriormente, a intervenção prática em caso real sob estudo.

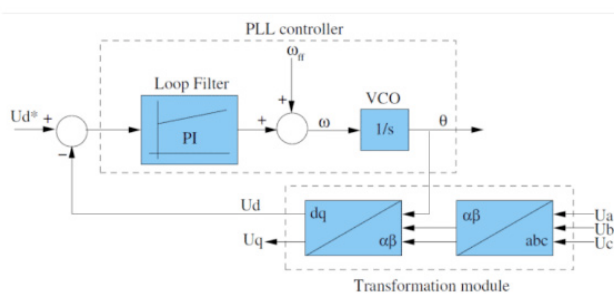


Figura 4: Topologia do algoritmo de controle do PLL [6].

A Figura 5 apresenta a topologia criada no ambiente de simulação computacional. Nessa estrutura inicialmente é feita a captação da tensão da fonte da rede, bloco GRID defasagem 0° , aplicadas as transformadas anteriormente apresentadas e inserido o sinal resultante num controlador PID que realizará o realinhamento, pois sua outra entrada

está recebendo o sinal oriundo da fonte GD, chamada de GD defasagem 30°, no bloco correspondente. Em ambos casos, o sinal resultante refere-se às tensões de eixo direto (Vd) que devem estar casadas, para efetivar o sincronismo. As Figuras 6 e 7 apresentam estas etapas do sistema. A constante proporcional (P) foi configurada em 180, a integral em 3200 e a derivativa em 1, conforme indicação da bibliografia [4].

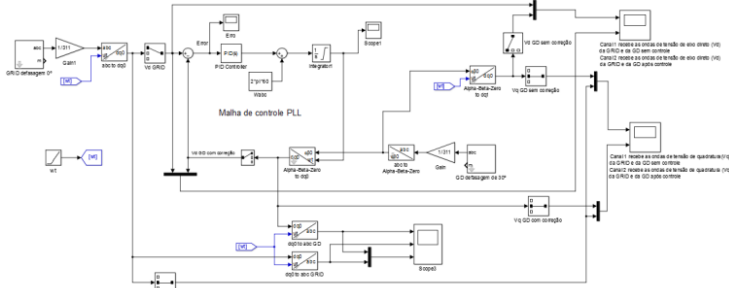


Figura 5: Topologia completa de simulação.

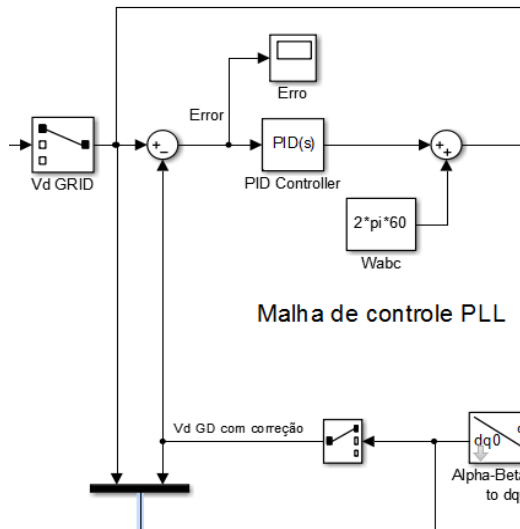


Figura 6: Sistema de correção com controlador PID.

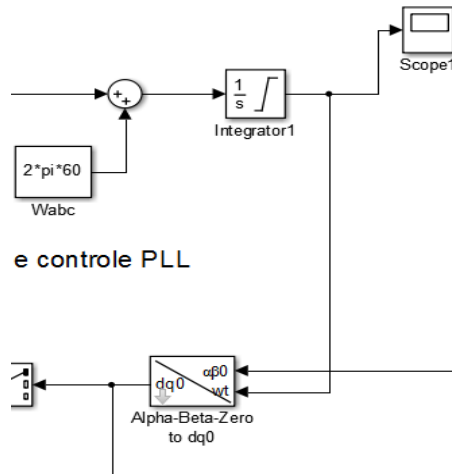


Figura 7: integrador para sincronismo GD – GRID.

Posteriormente, um integrador faz a junção dos sinais e realimenta o sistema de sinal da GD para inserir a correção e criar o sincronismo entre as duas fontes, Figura 7. Este integrador possui uma referência circular $2\pi f$, para fonte senoidal de sinal que o prende aos 60 Hz da rede, de forma a manter o sistema sem desvios de frequência.

A) Acoplamento

Os sinais de tensão tanto da rede como da GD dependem de certa instrumentação para serem adquiridos e entrar no algoritmo de controle PLL. Tal aquisição pode ser feita com o uso de acopladores óticos.

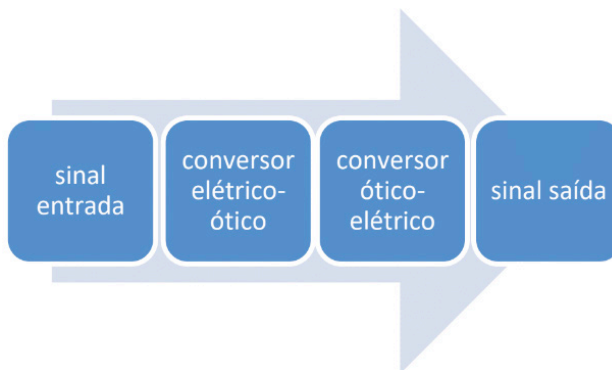


Figura 8: Esquema do acoplamento ótico.

O acoplamento ótico dos sinais torna capaz de omitir da simulação sua existência. Esse fator ocorre devido ao isolamento elétrico entre as partes de entrada e saída. Há

apenas um sinal óptico entre um par de acoplamento, onde um sinal é reduzido até uma amplitude que o sistema de conversão possa transformar o sinal elétrico em luz, que será percebida pela saída e novamente convertida em eletricidade, Figura 8 [8].

Ainda, para esta aquisição de sinais, também poderia ser utilizado o amplificador com isolamento ótico, o qual é mostrado na Figura 10.

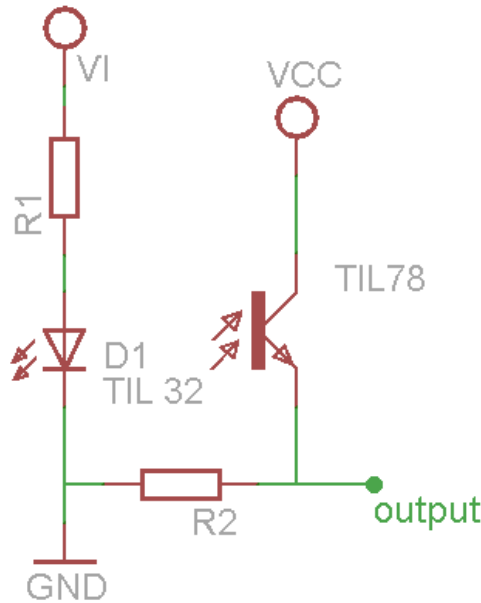


Figura 9: Diagrama de um acoplamento ótico [8].

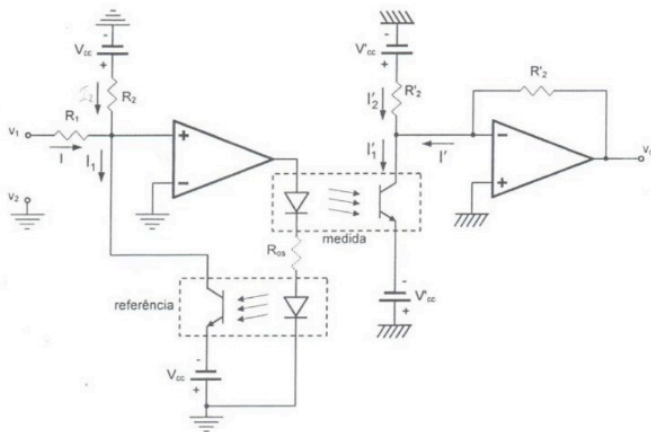


Figura 10: Circuito amplificador com isolamento ótico [9].

Para efetuar esse acoplamento pode ser utilizado um sistema rebaixador de sinal de forma a atribuir uma atenuação e colocar o sinal a ser analisado dentro de uma faixa

especificada pela tensão de alimentação a ser utilizada no conversor. Normalmente, um sistema com divisor de tensão e filtros gera um sinal de saída convertido dos 311 Vp para 5 Vp. A Figura 9 apresentou uma topologia básica desse tipo de acoplamento com o par ótico emissor e receptor, formados, neste caso, por um TIL32 e um TIL78. Assim, o sinal elétrico emitido pelo TIL32 é convertido em luz que é captada pela base do transistor TIL78, como se fosse a corrente de base de um TBJ, e convertido novamente em eletricidade no coletor ou emissor deste. Observação: existem Circuitos Integrados (CIs) dedicados a esta aplicação no mercado, como, por exemplo, o CI 4N25.

A topologia de captura de sinal permite, na Figura 9, aproveitar a queda de tensão sobre o resistor R2, a partir da condutividade apresentada pelo TIL78 de acordo com o sinal luminoso recebido em sua base semicondutora. Com a saída no emissor não há inversão de fase, enquanto que no coletor haveria uma defasagem de 180° no sinal.

B) GD com Fonte Hidráulica

A fonte hidráulica apresenta uma grande inserção na matriz de energia elétrica brasileira. Os pequenos aproveitamentos dessa energia significam, em sua maior parte, pequenos problemas ambientais e baixa ocupação de área para alagamento. Assim, é importante que ela seja corretamente sincronizada com a rede devido, principalmente, aos seus geradores serem em corrente alternada e dependerem do sincronismo para manter a estabilidade do sistema.

O algoritmo PLL pode ser implementado em um microcontrolador do tipo PIC, DSP, ARM, etc. Sendo que os sinais de tensão são lidos no microcontrolador após passarem pelo circuito de isolamento. No microcontrolador é implementado o algoritmo PLL, responsável pela sincronização. A ilustração esquemática do processo de sincronismo pode ser vista na Figura 11.

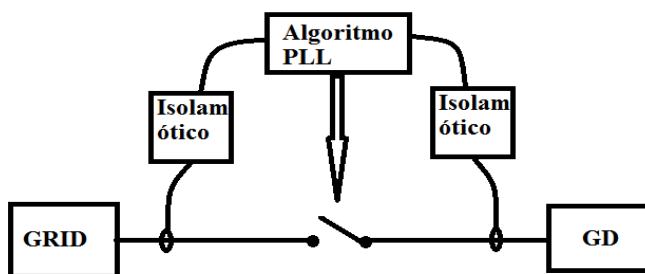


Figura 11: Esquema do processo de sincronismo entre a rede e a GD.

Quando o algoritmo PLL fizer o travamento em fase das tensões da rede e da GD, as duas fontes podem ser interligadas. Dessa forma, a aplicação do PLL para sincronizar rede e gerador deve estar associada aos controladores locais da GD de forma a criar um

ambiente totalmente controlado.

4 | RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS TESTES

Ao efetuar as simulações obteve-se o resultado apresentado na Figura 12. Percebe-se que a defasagem previamente definida está presente em 30° . Após passar pelo sistema proposto PLL a defasagem é totalmente eliminada. Fazendo com que as tensões de eixo direto da tanto da GRID como da GD sejam iguais a 1, em valor por unidade (pu). Convém ressaltar que defasagens maiores ou menores obtiveram o mesmo resultado de saída.

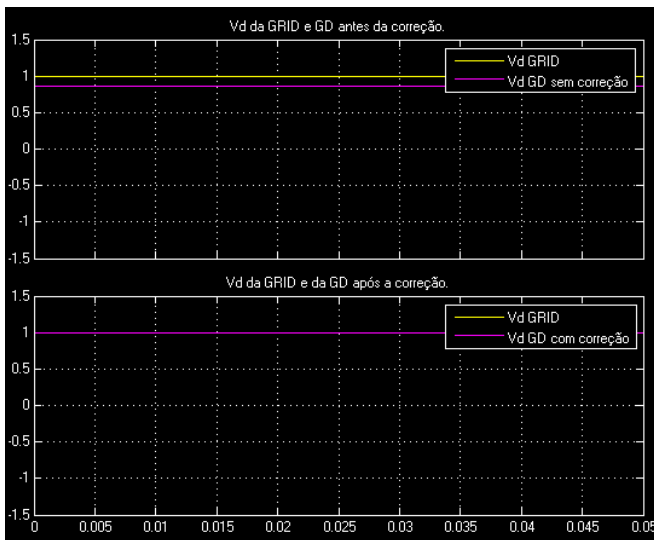


Figura 12: Sinais de Vd da GRID e da GD antes e após a correção

De acordo com a teoria apresentada no item C, da Seção II, quando ambas as fontes estão em fase, a projeção da tensão de quadratura (Vq) da GD sobre a (Vq) da GRID deve ser zero. Isso pode ser observado na Figura 13.

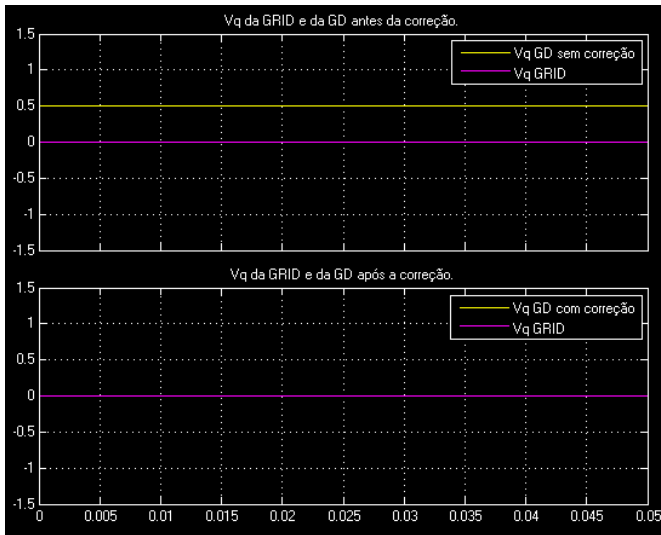


Figura 13: Sinais de V_q da GRID e da GD antes e após a correção.

Quando a rede e a GD apresentarem tensões de eixo direto são iguais a um, e as tensões em quadratura forem iguais a zero, significa que as mesmas estão sincronizadas. Esse resultado é mostrado na Figura 14, onde é feita a transformada de Park ($dq0$) para o eixo trifásico (abc), das tensões da GRID, da GD após a correção e da GRID e da GD corrigida juntas.

Para efetuar o controle com o PLL, o Matlab dispõe de um bloco com a estrutura anteriormente descrita. A Figura 15 apresenta uma topologia reduzida, usando essa ferramenta do *software*. Além disso, para simular outras condições, foi adicionado um sinal com harmônicas na sequência 0 de ordem 3 e 5, nas fases a e b , respectivamente, com amplitudes 5 e 8, através da fonte trifásica da rede. Os controladores foram mantidos com os mesmos parâmetros anteriormente descritos, obtendo o resultado apresentado na Figura 16.

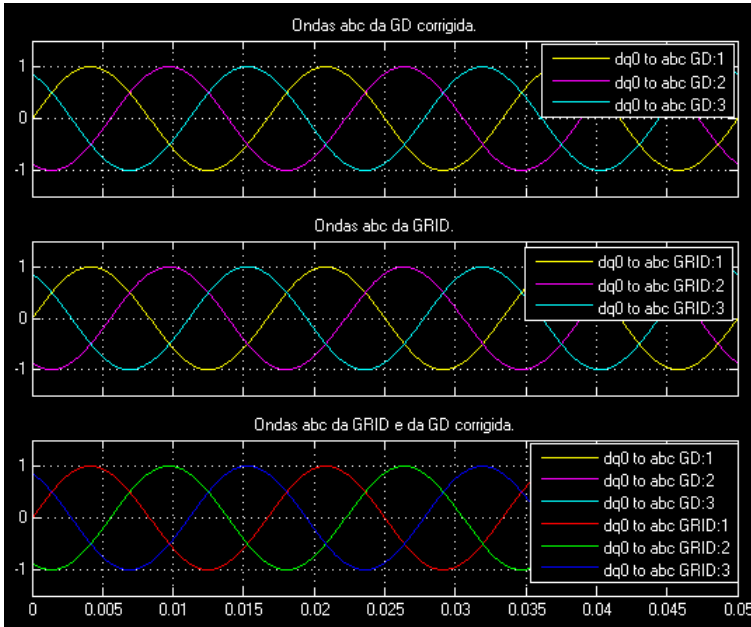


Figura 14: Ondas de tensão *abc* da GRID, da GD e de ambas juntas após a correção.

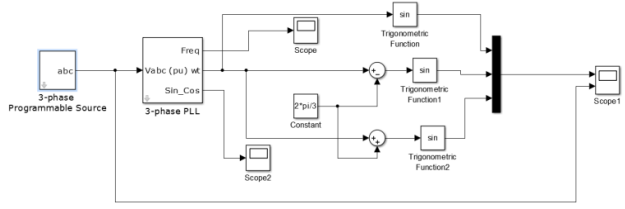


Figura 15: Controlador PLL aplicado.

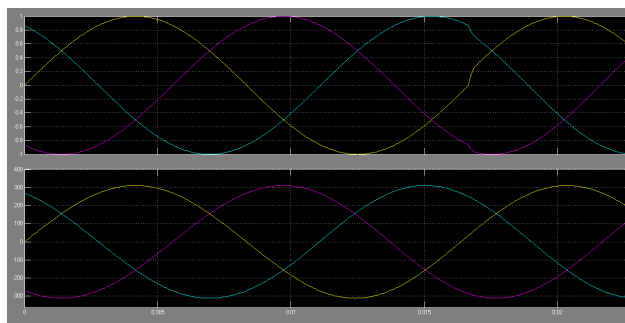


Figura 16: Resultados obtidos pelo filtro PLL após inserção de harmônicas.

Pode ser percebido que o filtro atua também na atenuação das distorções harmônicas, mas não com uma efetividade total. Como o ajuste para esta funcionalidade não está sendo estudado, é um recurso que não será explorado. Foi apresentado para demonstrar as capacidades de filtragem do PLL devido aos seus controladores e filtros internos, detalhados anteriormente.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme observado nas simulações executadas o controle PLL é efetivo no sincronismo de sistemas trifásicos. Sendo assim, imprescindível para inserção da GD na rede elétrica, principalmente em baixa tensão, pois dispensa sincronismo local podendo escravizar a fonte na rede primária do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Esse fator aumenta a confiabilidade na integração dos sistemas e vem propiciando a inserção de microgeração e minigeração na rede de distribuição de energia [10].

O desenvolvimento do país nas últimas décadas, aliado ao aumento da dependência da energia elétrica pelo ser humano, tornam o conhecimento profundo dos SEPs um fator essencial, além de obrigatório.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecemos também ao INCTGD e aos órgãos financiadores (CNPq processo n° 465640/2014-1, CAPES processo n° 23038.000776/2017-54 e FAPERGS n° 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. BONATO, Tese_Sistema inteligente para previsão de carga multinodal em sistemas elétricos de potência, Ilha Solteira/SP: USP, 2010.
- [2] I. BARBI, “A Transformação de Park e a Máquina Simétrica,” em *Teoria Fundamental do Motor de Indução*, Florianópolis/SC, UFSC, 1999, pp. 64 - 85.
- [3] A. k. TYAGI, Matlab and Simulink for Engineers, Oxford USA Professional, 2012.
- [4] J. P. ARRUDA, Dissertação_Métodos de sincronização de conversores em sistemas de geração distribuída., Recipe/PE: UFPE, 2008.
- [5] D. Z. a. P. G. D. Xie, “Research on Phase-Locked Loop Control and Its Application.,” *IEEE*, pp. 818-821, 2016.
- [6] M. L. P. R. A. Teodorescu, “PLL Algorithm for Power Generation Systems Robust to Grid Voltage Faults.,” *IEEE*.
- [7] Aneel, “BIG-Banco de Informações de Geração,” ANEEL, 10 2016. [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/big-banco-de-informacoes-de-geracao/655808?inheritRedirect=false. [Acesso em 11 2016].
- [8] L. & B. R. L. NASCHELSKY, Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, São Paulo: Pearson, 2004.
- [9] F. Farret, “Amplificadores para instrumentação,” Santa Maria-RS, 2012, p. 31.
- [10] Aneel, “ANEEL,” 11 2015. [Online]. Available: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. [Acesso em 11 2016].

ÍNDICE REMISSIVO

A

Algoritmo evolucionário adaptativo 109, 112, 113

Antenas 159, 160, 161, 164

Ar condicionado 87, 88, 132, 133, 134, 135, 136, 139, 141, 143

Automação avançada da distribuição 69

B

Balanceamento de carga nas fases 29

Biocombustível 173, 178

C

Ciber-físico 69, 73, 80

Consumo de energia elétrica 40, 56, 59, 62, 82, 85, 117, 133

Controladores suplementares 41, 47, 51, 52

Controle preditivo 132

D

DRA 159, 160, 161, 163, 165

E

Eficiência energética 55, 56, 57, 59, 61, 65, 67, 68, 82, 90, 117, 119, 130, 133, 143

Emulador de redes 69, 70, 71, 72, 79, 81

Estabilidade a pequenas perturbações 41, 42, 48

Estabilizadores de sistema de potência 41, 42

Estimação de estados 109, 110, 111, 115

F

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

G

Generalize unified power flow controller 41, 42

Gestão da energia 68, 82, 84, 88, 90

Gestão de energia elétrica 56

H

Hardware-in-the-loop 69, 72

M

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

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

Método de soma de correntes 15, 19

Método PLL 1

Micro-ondas 159, 160, 162, 165

Modelo de Hammerstein 145, 149

O

Óleo vegetal 173

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

Otimização por enxame de partículas 41

P

PID-IMC 132, 133, 139

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

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

R

Recursos públicos 56

Redes de petri hierárquicas temporizadas 29

S

Simulações de sincronismo 1

Sincronização de geração distribuída 1

Sistema de localização indoor 145

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

Sistemas de distribuição de energia elétrica 15

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

Smart grids 29, 69, 81

Sohxlet 173

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

T

Termografia 167, 169, 172

Termovisor 167





Transformadas de Clarke e Park 1, 3

Trilateração 145, 147, 148, 149, 154

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

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

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

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

 **Atena**
Editora
Ano 2021