

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

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

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

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

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

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

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-133-3

DOI 10.22533/at.ed.333211706

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

APRESENTAÇÃO

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

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

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

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

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

Joelson Lopes da Paixão
Mauro Fonseca Rodrigues
José Oizimas Junior

DOI 10.22533/at.ed.3332117061

CAPÍTULO 2..... 15

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117062

CAPÍTULO 3..... 29

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117063

CAPÍTULO 4..... 41

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117064

CAPÍTULO 5..... 55

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

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117065

CAPÍTULO 6..... 69

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117066

CAPÍTULO 7..... 82

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

Carollina Silva de Santana
Armando Hirohumi Tanimoto

DOI 10.22533/at.ed.3332117067

CAPÍTULO 8..... 91

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

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

DOI 10.22533/at.ed.3332117068

CAPÍTULO 9..... 109

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

Lucas Luiz Lunarti
Maury Meirelles Gouvêa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117069

CAPÍTULO 10..... 117

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

Vinicius Pedroza Delsin
Antonio Newton Licciardi Junior

DOI 10.22533/at.ed.33321170610

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

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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 07/03/2021

Luiz Henrique Leite Rosa

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo - SP
<http://lattes.cnpq.br/7461610293948635>

Marcio Ribeiro Cruz

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo - SP
<http://lattes.cnpq.br/4573846858308931>

Carlos Frederico Meschini Almeida

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo - SP
<http://lattes.cnpq.br/2319455831927610>

Nelson Kagan

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo - SP
<http://lattes.cnpq.br/4099429752287231>

Alexandre Dominice

EDP Brasil
São Paulo - SP
<http://lattes.cnpq.br/9971995503744198>

RESUMO: O presente trabalho trata da pesquisa e desenvolvimento do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes do NAPREI/USP, desenvolvido no âmbito P&D ANEEL em um projeto proposto e patrocinado pelas empresas do Grupo EDP Brasil, com objetivo de servir como plataforma para testes em tempo real de soluções e funcionalidades de Redes Elétricas Inteligentes

(REI), usando abordagem de sistemas ciber-físico, contemplando dispositivos inteligentes (IEDs e Smart Meters) e sistemas de TI, em ambiente controlado. Além da concepção geral do laboratório é apresentada uma aplicação do ambiente para teste e validação de um algoritmo de localização de cabo rompido como estudo de caso.

PALAVRAS-CHAVE: Automação Avançada da Distribuição, Emulador de redes, Hardware-in-the-Loop, Smart Grids, Ciber-Físico.

SMART GRID LABORATORY: CYBER-PHYSICAL ENVIRONMENT FOR SYSTEMIC TESTS OF SMART GRID FUNCTIONALITIES

ABSTRACT: The present work deals with the research and development of the Smart Grids Laboratory of NAPREI / USP, sponsored by R&D ANEEL program and EDP Brasil Group, aiming to be a platform for real-time testing of solutions and Smart Grids functionalities and using a cyber-physical systems approach including intelligent devices (IEDs and Smart Meters) and IT systems, in a controlled environment. In addition to the general design of the laboratory, an application of the environment for testing and validation of a broken cable location algorithm is presented as case study.

KEYWORDS: Advanced Distribution Automation, Power Network Emulator, Hardware-in-the-Loop, Smart Grids, Cyber-Physical.

1 | INTRODUÇÃO

As operações dos sistemas de distribuição têm mudado principalmente com a introdução de aplicações e sistemas avançados como integração de microgrids, geração distribuída, veículos elétricos, sistema de gestão de ocorrências, sistemas de controle de tensão e reativos, sistemas de gerenciamento de resposta à demanda, sensores e medidores inteligentes (Kagan, 2013).

Neste contexto, as empresas distribuidoras estão a desenvolver, em diferentes escalas e tempos de implantação, projetos piloto e provas de conceito em REIs que deverão nortear e amadurecer o conhecimento das empresas neste novo paradigma. Entretanto, a realização de testes e análises sistêmicas é um grande desafio, uma vez que os resultados alcançados nos projetos piloto dependem de muitos fatores relacionados à topologia da área, tamanho da rede, ocorrências e eventos do sistema (falhas, sobrecargas, chaveamento) sendo que, normalmente, os resultados ficam restritos à área de estudo.

Além disso, a introdução de novas tecnologias em sistemas elétricos existentes pode causar grandes transtornos, uma vez que problemas de incompatibilidade, falhas de operação de equipamentos, falhas de comunicação, problemas de TI, falta de integração entre sistemas e outras adversidades, são comuns e podem comprometer tempos de implantação e comissionamento e até gerar problemas relativos à segurança, qualidade do produto e continuidade do fornecimento de energia.

Os transtornos mencionados acima podem ser minimizados com a realização de testes em ambiente controlado que permitam a análise sistêmica das funcionalidades de REIs e que ao mesmo tempo envolvam sistemas de TI, tecnologias de comunicação e IEDs reais, como aqueles presentes em campo, de forma a antecipar possíveis problemas de parametrização, integração com os sistemas supervisórios, interoperabilidade de equipamentos e sistemas, problemas de comunicação e outros.

Neste contexto, o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes serve como plataforma para testes de novas soluções e funcionalidades de REIs envolvendo IEDs reais, medidores inteligentes e sistemas de TI em ambiente controlado, auxiliando as concessionárias de energia em todas as etapas de implantação das redes elétricas inteligentes.

Este trabalho trata da pesquisa e desenvolvimento para criação deste ambiente, um projeto patrocinado pelas distribuidoras do grupo EDP Brasil através de projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D ANEEL, bem como de sua aplicação em estudo de caso para validação da funcionalidade de localização de cabo rompido em uma rede da própria EDP.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do laboratório utilizando uma abordagem ciber-física, e a interação entre os blocos componentes do projeto são apresentadas na seção II. A seção III detalha o funcionamento do emulador de redes e seu papel na plataforma de testes. A seção IV apresenta a ilha de medição e sua aplicação para o estudo das funcionalidades de medição inteligente. A seção V descreve as atividades

realizadas para viabilizar a aplicação de funcionalidades de automação avançada no laboratório, incluindo os sistemas de TI que instalados em um ambiente do laboratório chamado Centro de Operação da Distribuição (COD) Virtual. A seção VI apresenta uma aplicação do laboratório para teste e validação de uma funcionalidade de automação avançada.

2 | DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O desenvolvimento do laboratório de REIs foi estruturado em quatro blocos, os quais serão descritos nesta metodologia, sendo eles:

- I. Emulador de redes elétricas.
- II. Automação de Redes Elétricas Inteligentes.
- III. Ilha de medição.
- IV. Tecnologia da informação e interoperabilidade e COD virtual.

A partir da estruturação e desenvolvimento dos blocos mencionados, o laboratório de REIs alcançou seus principais objetivos, que se traduzem nos benefícios para as empresas distribuidoras que venham a utilizar este ambiente, destacando-se:

- Emulação de Redes Elétricas Inteligentes, contemplando as redes reais das concessionárias, seus dispositivos de controle (IEDs) típicos de campo e medidores inteligentes.
- Análise prévia e sistêmica das funcionalidades de REIs como localização de falta, isolamento da falta, restauração automática, controle de tensão e reativos, medição inteligente, dentre outras.
- Testes de integração e de protocolos de comunicação entre equipamentos de fabricantes diversos.
- Testes de interoperabilidade dos sistemas de TI demandados pelas funcionalidades de REIs
- Treinamento de pessoal por meio do COD Virtual, possibilitando a necessária capacitação da empresa em novos sistemas, procedimentos e tecnologias.

A figura 1 apresenta o ambiente laboratorial de REIs contemplando seus blocos estruturantes.

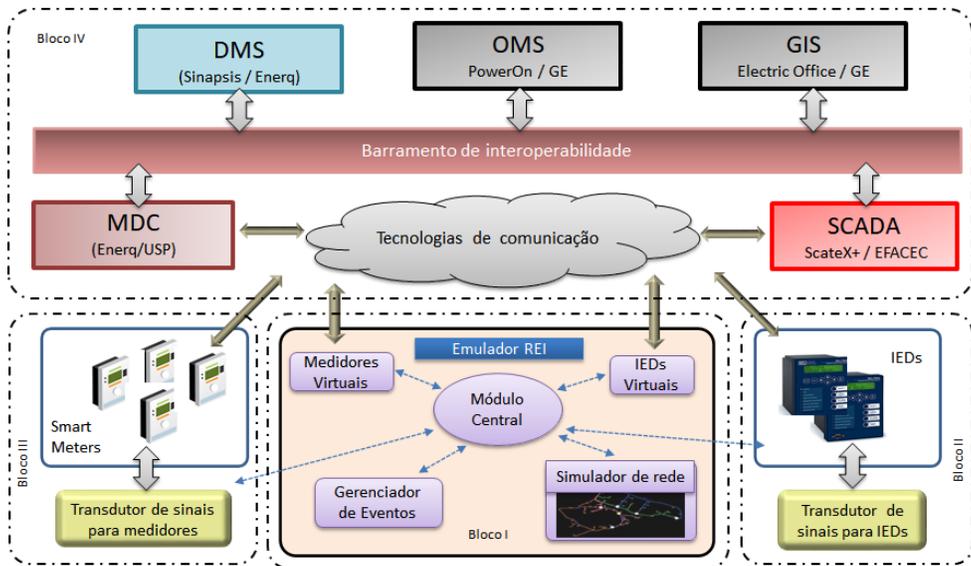


Figura 1 - Ambiente laboratorial de REIs, destaque para o Emulador REI ao centro.

2.2 Emulador de REIs

O emulador de redes elétricas inteligentes, apresentado no bloco I da figura 1, pode ser entendido como uma representação digital e dinâmica de redes elétricas, realizando simulações de sistemas elétricos contemplando diversos eventos de rede, capaz de gerar, em conjunto com o transdutor de sinais do bloco II, os sinais elétricos de tensão e corrente para IEDs reais e receber sinais e comandos destes dispositivos, trazendo o equipamento para um ambiente da simulação de tempo real. Esta é uma característica típica das técnicas de hardware-in-the-loop (HIL), cuja aplicação em sistemas elétricos e eletrônicos cresceu significativamente na última década, combinando componentes de software e componentes físicos reais em simulações de tempo real (Huerta & Gruber & Prodanovic & Matatagui, 2014).

O emulador de redes elétricas inteligentes é constituído de 5 módulos de software e hardware que permitem a realização das diversas funcionalidades desejadas. Tais módulos são descritos a seguir.

A - Módulo simulador de sistemas de potência

Este módulo é responsável pelos cálculos de fluxo de potência, curto-circuito e alterações na rede de estudo. Para esta tarefa foi escolhido um software de simulação de sistemas de potência chamado SINAP, que apresenta as seguintes funcionalidades:

- Visualização gráfica de redes de distribuição com representação georreferenciada;

- Rotinas de cálculo de fluxo de potência;
- Rotinas de cálculo de curto-circuito;
- Representação de chaves manobráveis na rede;
- Representação de geradores, cargas e suas curvas de demanda diárias.

Por meio da integração entre o módulo central e o simulador, o primeiro pode solicitar qualquer informação calculada pelo simulador, como valores de tensão nas barras, valores de correntes nos elementos de rede e transferir estas informações imediatamente para o transdutor. O módulo central pode também atuar sobre o simulador, enviando, por exemplo, comandos para alteração das chaves existentes, dos bancos de capacitores, dos taps de transformadores e reguladores de tensão, provocando assim alteração no estado da rede.

B - Módulo configurador de eventos

O Módulo Configurador de Eventos é responsável pela definição e configuração de eventos, como por exemplo, ocorrência de curto-circuitos de tipo definido em qualquer ponto da rede, alteração no valor de cargas e fontes, manobras e outras alterações no estado da rede, que advêm durante a simulação com base em uma linha de tempo pré-definida.

Para isso, o Módulo Configurador de Eventos conta com uma interface para criação e parametrização dos eventos, contemplando tipo de evento, local da rede onde acontece o evento, equipamento(s) envolvido(s), parâmetros específicos (por exemplo, a impedância do curto no caso de uma falta para terra), entre outros. Além disso, através deste módulo, o usuário pode informar dentro da linha de tempo da simulação, os instantes em que cada evento deverá ocorrer.

C - Módulo Central

O módulo central é responsável pelo controle do fluxo de informações de todos os blocos do Emulador, bem como dos módulos transdutores, conforme mostrado na figura 1. Isto é possível graças à sua capacidade de sincronização de mensagens orientada a evento.

A abordagem de sincronização baseada em eventos tem sido utilizada como solução para co-simulação de sistemas de energia e redes de comunicação (Yang, 2013) e (Lin, 2012). Uma abordagem similar foi implementada para o Emulador de REIs, conseguindo assim a sincronização entre todos os módulos envolvidos neste ambiente ciber-físico. O Módulo Central desempenha um papel importante na sincronização orientada a eventos, uma vez que este módulo é responsável por controlar o fluxo de dados entre módulos por meio da organização dos dados trocados com o Módulo de Simulador numa fila de eventos global considerando a estampa de tempo de cada evento.

D – Dispositivos virtuais

Os Dispositivos Virtuais são rotinas de software que simulam o comportamento de um IED ou um medidor inteligente real, contemplando leitura de grandezas elétricas, controle de equipamentos e funções inteligentes, incluindo a capacidade de comunicação com softwares supervisórios como SCADA e MDM para IEDs e medidores inteligentes respectivamente.

O estudo de funcionalidades que utilizam muitos dispositivos reais pode se tornar inviável, seja por causa do custo ou pela dificuldade de se instalar fisicamente tantos equipamentos dentro de um laboratório. Neste contexto, a integração de dispositivos Virtuais no emulador pode viabilizar o estudo, uma vez que podem se “comportar” como dispositivos reais, com características equivalentes e, ao mesmo tempo, atender determinada funcionalidade, substituindo um ou mais dispositivos reais.

E - Módulo transdutor de sinais

O Módulo transdutor de sinais do emulador é responsável pelo recebimento e interpretação dos dados provenientes do módulo central, geração dos sinais analógicos e digitais, aquisição de dados digitais e envio de mensagens para o módulo central. O hardware PXI da National Instruments é quem abriga o Módulo Gerador/Coletor, programado na linguagem Labview, que contempla 7 placas com 32 canais analógicos e 8 canais digitais cada, possibilitando a geração dos sinais digitais e analógicos e aquisição de sinais digitais para o emulador. A figura 2 apresenta o hardware PXI, identificado com a letra A, de onde saem os cabos de sinais para os painéis de conexão (identificados com a letra B), os quais facilitam as conexões com os amplificadores de sinais.

Os sinais analógicos externados são sinais de tensão, com amplitude de 10V, que representam as tensões e correntes defasadas no tempo, simuladas na rede digital. Estes sinais são encaminhados ao módulo de condicionamento de sinais, que se encarregará de amplificar e condicionar para os níveis de tensão e corrente requeridos pelos IEDs.

Os sinais digitais representam os estados dos equipamentos presentes na rede como, por exemplo, o estado das chaves (aberto/fechado) que seguem para os IEDs de seu respectivo equipamento de rede.

Além disso, por meio do monitoramento das saídas digitais dos IEDs, o módulo realiza a aquisição dos sinais referentes aos comandos para controle dos equipamentos de potência (trip/close de disjuntor, comandos para subir/descer taps, fechar chaves e outros). Tais comandos são provenientes das saídas específicas dos IEDs utilizadas para comando dos equipamentos de campo, porém, no ambiente laboratorial, são integrados através dos equipamentos de condicionamentos de sinais.

Os equipamentos para condicionamento de sinais, identificados na figura 2 com as letras C e D respectivamente, são responsáveis pela adequação dos sinais de tensão

e corrente para os mesmos níveis dos sinais de tensão e corrente dos secundários dos transformadores TP e TC respectivamente, que normalmente fornecem os sinais para os IEDs instalados em campo. Desta forma, através deste módulo, os IEDs podem funcionar e atuar como se estivessem recebendo os sinais de campo e não emulada.

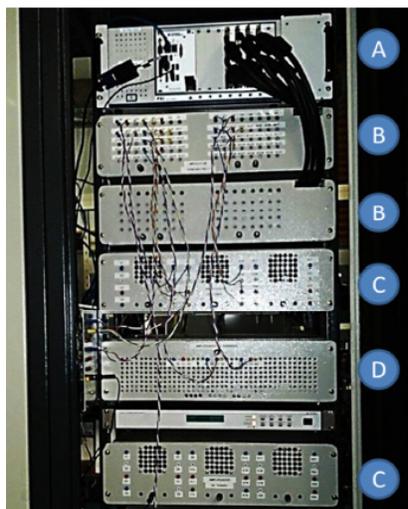


Figura 2. Transdutor de sinais, contemplando: A) hardware PXI, B) painéis de conexão, C) amplificadores de tensão, D) amplificadores de corrente.

2.3 Ilha de Medição

O bloco III denominado ilha de medição (IM) é constituído por emuladores de cargas (EC), medidores inteligentes (MI), medidores virtuais (MV) e infraestrutura de comunicação, sendo capaz de representar qualquer situação de consumo/geração de consumidores de energia elétrica pertencentes a uma rede elétrica de distribuição. As situações emuladas são detectadas e registradas tanto pelos medidores inteligentes quanto pelos MVs, que são rotinas de software que imitam os MIs e também se comunicam com o sistema MDM, responsável pelo gerenciamento da medição através da infraestrutura de comunicação do laboratório, além de receber comandos operativos pela mesma infraestrutura. A figura 3 ilustra a IM montada no laboratório de REI.

A infraestrutura da ilha de medição permite simular e testar funcionalidades presentes em MI, como: comunicação com sistemas de gestão de medições, funções de corte e religamento de energia remoto e alarme de last-gasp que é caracterizado pelo envio de uma rápida mensagem em caso de falta de energia nos MI (Singh & Bapat & Das, 2013).



Figura 3. Ilustração da IM montada no Laboratório de REI.

Cada medidor é alimentado por um emulador de carga (EC), idealizado e desenvolvido no âmbito do projeto, capaz de impor aos MIs condições controláveis de consumo ou geração de energia através do controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada uma das tensões e correntes que percorrerão o circuito de medição dos MIs, sendo uma das partes fundamentais da IM. Os valores das grandezas a serem geradas pelos EC são obtidos da mesma simulação da rede de distribuição utilizada no emulador de rede, por meio de uma integração específica para esta finalidade.

Cada EC é um dispositivo que conta com três canais de saída de tensão (faixa de tensão de 25 a 250 V) e corrente (faixa de corrente de 0,01 a 10 A), com controle individual das amplitudes e ângulos de fase das tensões e correntes de cada canal (faixa de 0° a 360°), de forma a alimentar um MI trifásico, ou operar com os canais em modo monofásico que permite alimentar até três MI monofásicos por EC ou um bifásico e um monofásico por EC.

A IM está integrada à infraestrutura de medição inteligente constituída por um sistema de comunicação que utiliza protocolo DLMS/COSEN para integração com o sistema de gerenciamento das medições (MDM). Dessa forma, os MI que fazem parte da IM enviam, através da infraestrutura de comunicação, os registros de medição emulados para o MDC/MDM, que disponibiliza as medições para os demais sistemas através do barramento de interoperabilidade. Testes de funcionalidades de envio de mensagens e comandos de corte/religa dos MI podem ser realizados por meio da mesma infraestrutura de comunicação da IM. Nota-se, então, que o sistema proposto está plenamente integrado e, por essa razão, permite realizar diversas avaliações e explorar diversos aspectos de medição inteligente dentro da infraestrutura das REI.

2.4 Tecnologia da Informação, Interoperabilidade e COD Virtual

Atualmente, a automação das redes de distribuição de energia elétrica envolve a integração de equipamentos de campo com o sistema centralizado de supervisão, controle e aquisição de dados (SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition), por meio de

funcionalidades simples de telecomando.

A automação avançada de redes de distribuição de energia elétrica, por sua vez, integra-se com sistemas como Outage Management System (OMS), Metering Data Management (MDM) e Distribution Management System (DMS). Nesse novo contexto, uma quantidade maior de informações é utilizada para determinar ações corretivas de forma mais rápida ou, até mesmo, de melhoria de desempenho do sistema. Além disso, de acordo com as particularidades das empresas de distribuição, as definições das ações podem ser feitas de forma distribuída, por meio dos IEDs instalados em campo, ou de forma centralizada, com o apoio de sistemas altamente sofisticados, nos centros de operação.

O estudo da automação avançada neste projeto e desenvolvimento do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes do NAPREI/USP envolveu a realização de atividades que permitiram reproduzir, em ambiente controlado, o exato funcionamento da rede de distribuição real, bem como averiguar o impacto de tecnologias de vanguarda, como a aplicação de funcionalidades avançadas de automação da distribuição.

Entretanto, para que as funcionalidades avançadas de automação possam atingir toda sua potencialidade, a aplicação dos conceitos de interoperabilidade é de importância fundamental, dado que os processos e funcionalidades relacionados envolvem a interação de inúmeros componentes e sistemas.

No âmbito do laboratório, a implementação do barramento de interoperabilidade foi realizada utilizando-se de ferramentas de mercado, permitindo a troca de mensagens entre os diversos sistemas.

No laboratório, uma sala de controle denominada COD Virtual, interligada ao Emulador de Rede, abriga os sistemas de TI e o barramento de interoperabilidade. Este ambiente, apresentado na Figura 4 vem sendo utilizado para testes de funcionalidades, treinamentos e realização de simulações com foco em Redes Elétricas Inteligentes.



Figura 4. COD Virtual

2.5 Estudo de Caso

Este estudo de caso tem por objetivo demonstrar potencialidades do laboratório, apresentando os testes e validação de um algoritmo específico para localização de cabo rompido, com alta impedância de defeito para terra, em uma rede elétrica inteligente contendo medidores inteligentes e tecnologias de automação da distribuição.

O algoritmo foi implementado no sistema DMS instalado no laboratório NAPREI e se baseia nos dados de consumidores com falta de energia em um dado instante, permitindo a identificação de cabos rompidos ou faltas de alta impedância em redes radiais a partir de dados de consumidores sem energia.

As informações sobre falta de energia são provenientes do sistema MDM que coleta os alertas de falta de energia enviados por medidores inteligentes. Por outro lado, as informações sobre o estado da rede e alarmes dos dispositivos de proteção (religadores, relés) são provenientes do sistema SCADA. Todos estes sistemas, bem como o sistema de Gerenciamento de Ocorrências (OMS) são integrados de forma a permitir a troca de informações entre eles.

De forma simplificada, a sequência de eventos que se verifica durante a execução da funcionalidade é a seguinte:

- 1 – Smart Meters sem energia, devido ao rompimento de cabo, enviam mensagens de “last gasp” para o MDM
- 2 – MDM registra as mensagens dos medidores e encaminha para o DMS
- 3 – DMS localiza o cabo rompido e informa ao OMS, que registra a ocorrência e apresenta no mapa.
- 4 – DMS envia sugestão de manobras para o SCADA para isolamento do defeito
- 5 – SCADA envia os comandos para os IEDs que vão atuar no campo (emulador)

A rápida identificação e isolamento de um cabo rompido que chega ao solo é muito relevante para a concessionária, pois pode prevenir acidentes fatais com transeuntes. Entretanto, em muitos casos, o cabo que chega ao solo, seja pelo lado da fonte, seja pelo lado da carga, não produz altas correntes de falta e, portanto, não sensibiliza os elementos de proteção da rede, como disjuntores, religadores ou chaves fusíveis, constituindo as chamadas faltas de alta impedância. Este problema é agravado em redes muito desequilibradas, nas quais a proteção de neutro recebe valor elevado para evitar atuações em condição normal, diminuindo a sensibilidade para detecção de cabos rompidos.

São vários os estudos para encontrar soluções para estes problemas (Ming & Jhy & Jin, 2005), porém, nota-se a dificuldade de se validar em campo um sistema que se propõe a solucionar o problema, uma vez que não se pode ter o controle sobre quando e como as faltas vão ocorrer, dificultando os testes e a definição dos parâmetros da solução para trabalhar de forma coordenada com os parâmetros dos equipamentos de campo como, por

exemplo, valores de pick-up para sobrecorrentes de fase e sobrecorrentes de neutro dos relés, alarmes de last gasp de medidores inteligentes e outros.

Neste contexto, o emulador de redes tem muito a contribuir, provendo um ambiente que integra, de um lado, os sistemas de TI com os seus respectivos algoritmos de controle e de outro os Medidores Inteligentes e os IEDs com as mesmas parametrizações de campo.

Para este estudo de caso foi escolhida uma rede real da concessionária EDP São Paulo, particularmente o alimentador RCO 1307, o qual possui uma extensão de 215 km de rede primária. Neste simulou-se um evento inicial, o rompimento do cabo da fase A, chegando ao solo com uma impedância de defeito de 30 ohm.

As figuras 5, 6 e 7 mostram o funcionamento esperado do emulador de redes e validação da funcionalidade de localização do cabo rompido. A figura 5 mostra as telas do MDC/MDM onde são apresentados os alarmes dos medidores inteligentes, de forma georeferenciada, antes e depois do rompimento de cabo. Destaque para as sinalizações em vermelho na tela da direita, mostrando a identificação dos pontos sem energia na rede.

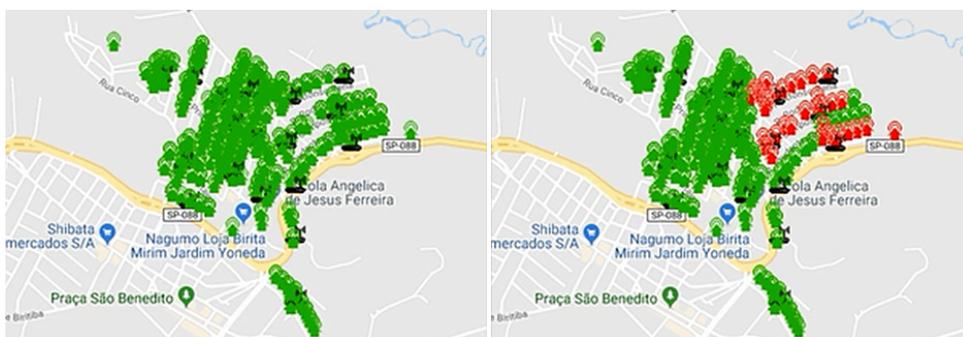


Figura 5. Telas do MDC/MDM apresentando os alarmes dos medidores inteligentes, de forma georeferenciada, antes (esquerda) e depois (direita) do rompimento de cabo.

A figura 6 mostra a tela do DMS identificando o trecho, em vermelho, com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito. Destaque para a mensagem de sugestão de manobra para o SCADA, visando a isolamento do trecho com defeito.

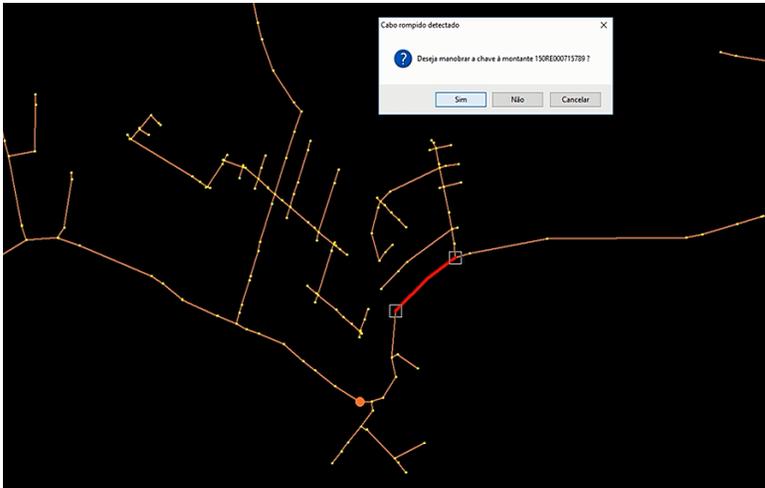


Figura 6. Tela do DMS identificando o trecho com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito na rede elétrica.

A figura 7 apresenta a tela do SCADA após da realização das manobras que isolam o trecho com defeito conforme comandos recebidos do DMS, encerrando a sequência de eventos.

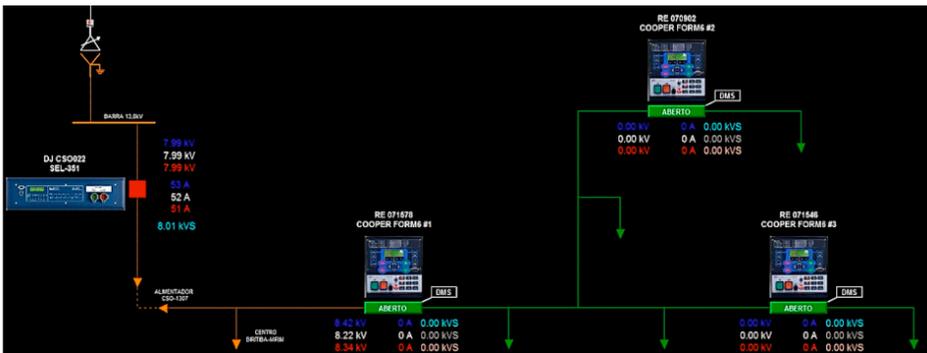


Figura 7. Tela do SCADA após da realização das manobras que isolam o trecho com defeito.

31 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o Laboratório de Redes Inteligentes desenvolvido pelo NAPREI-USP em parceria com o Grupo EDP para auxiliar as concessionárias de energia elétrica na implantação de funcionalidades ADA e de redes inteligentes, detalhando as atividades de pesquisa, desenvolvimento dos módulos e o ambiente laboratorial.

O laboratório foi criado como ambiente ciber-físico para servir como plataforma para testes em tempo real de soluções e funcionalidades de REIs em ambiente controlado,

contemplando dispositivos inteligentes (IEDs), medidores inteligentes e sistemas de TI.

O Emulador de Redes Elétricas Inteligentes foi discutido em detalhes, especialmente as características do simulador do sistema de potência e o Módulo Central, responsável pelo controle de fluxo de dados e sincronização da simulação.

O método de sincronização proposto baseado em eventos da simulação foi implementado no Módulo Central de modo a permitir a sincronização dos módulos de software e hardware do Emulador de Rede Inteligente. Tal abordagem mostrou-se consistente com relação aos sistemas reais e aos IEDs utilizados na distribuição de energia, sendo possível a utilização de equipamentos de custos muito mais baixos que os simuladores de tempo real disponíveis no mercado. Além disso, a simulação pode considerar uma rede real completa de distribuição de energia, descartando a necessidade de criar equivalentes de rede que muitas vezes levam a simplificar demais a representação da rede elétrica.

A funcionalidade de localização de cabo rompido, implementada no DMS, foi simulada no Emulador de Redes Inteligentes a fim de validar a abordagem proposta. O teste da funcionalidade demonstrou a robusta integração dos sistemas de TI (SCADA, DMS, MDM), medidores inteligentes e IEDs com o Emulador de Redes Inteligentes em um ambiente HIL, bem como a aplicação de abordagem orientada a eventos para sincronização do ambiente de simulação.

A infraestrutura desenvolvida no laboratório de Redes Elétricas Inteligentes mostrou-se apropriada para a realização de uma grande gama de testes e análises sistêmicas de funcionalidades inteligentes para melhoria dos sistemas de distribuição de energia das concessionárias e, ao mesmo tempo, constitui um ambiente propício para novos estudos e desenvolvimentos no âmbito das Redes Elétricas Inteligentes.

REFERÊNCIAS

KAGAN, N. 'Smart Grids in Brazil', 1st ed., Rio de Janeiro: SYNERGIA, 2013

Huerta F., Gruber J.K., Prodanovic M., Matatagui P. 'A Power-HIL Microgrid Testbed: Smart Energy Integration Lab (SEIL)' in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE

Yang C. H. 'Cosimulation Environment for Event-Driven Distributed Controls of Smart Grid'. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9, (3), August 2013, pp. 1423 – 1435.

Lin H. 'GECO: Global Event-Driven Co-Simulation Framework for Interconnected Power System and Communication Network'. IEEE Transactions on Smart Grid, 3, (3), pp. 1444 – 1456. IEEE 2012.

Singh A., Bapat J., Das D. 'Two Tier Communication Architecture for Smart Meter' in Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2013 Fifth International Conference

Ming T. Y., Jhy C. G., Jin L. G. 'Detection of downed conductor in distribution system'. IEEE Power Engineering Society General Meeting, (pp. 1107 – 1114), Vol. 2. IEEE 2005.

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