

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

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

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

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

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

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

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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

José Ruben Sicchar Vilchez

Universidade do Estado do Amazonas
Depto. Eng. Controle e Automação
Manaus – Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/7465143614586651>

José Reinaldo Silva

Universidade de São Paulo
Depto. Eng. Mecatrônica
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9317869378701106>

Carlos Tavares da Costa Júnior

Universidade Federal do Pará
Depto. Eng. Elétrica, ITEC
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/6328549183075122>

ABSTRACT: The recent evolution of smart grids is causing a big demand for new operations and services, especially for low-voltage consumers. Among those processes, load balancing detaches for ensuring stable states between feeders. This paper presents some results about the design of an automated process for load balancing feeders in final consumption units in urban microgrids using a Timed Hierarchical Petri net. The main objective is to verify the properties of the proposed system and establish an efficient and reliable workflow to automate load balancing and ensure stability while minimizes intervention. As a result, obtained it is improved the quality of power

service for low-voltage final consumers.

KEYWORDS: Smart Grids. Phase-load Balancing. Timed Hierarchical Petri Nets.

PROCESSO AUTOMATIZADO PARA ANÁLISE DE BALANCEAMENTO DE CARGA EM REDES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO VIA REDES DE PETRI

RESUMO: A recente evolução das smart-grids tem causado uma grande demanda de novos serviços especialmente nos consumidores da rede de distribuição de baixa tensão. Entre os quais, encontra-se o processo de balanceamento de cargas nas fases dessa rede. Este artigo apresenta os resultados da modelagem de um processo automatizado formado por sub-processos específicos para o balanceamento de carga nas fases das unidades consumidoras finais, em micro redes urbanas usando redes de Petri Hierárquicas Temporizadas. O objetivo principal é validar as propriedades do sistema proposto e estabelecer um fluxo de processos eficientes e confiáveis para automatizar o balanceamento de carga e garantir a estabilidade com mínimas intervenções. Como resultado, obteve-se a melhora da qualidade do serviço de energia aos consumidores de baixa tensão.

PALAVRAS-CHAVE: Smart Grids. Balanceamento de Carga nas Fases. Redes de Petri Hierárquicas Temporizadas.

1 | INTRODUÇÃO

The perspective of having smart grids (SG) from the low-voltage (LV) legacy power grid became closer since new approaches, are

developing to retrofit its current architecture in a new standard called urban microgrids [2]. This system mixes the power distributed from the transformer of the LV circuit and the power injection produced by the FCUs from distributed power sources (DPS). This enhances the load stability in the grid, as a mix resource of microgrids or multimicrogrids against the load imbalances in the LV grid [9].

Within this focus, the power injection from FCUs, such as microgrids or multimicrogrids, efficiently mitigates the problem of load imbalance in the power transformer phases of the LV grid. Thus, it is an effective solution that has been adopted especially in countries that encourage the production of alternative energy by the final consumer. However, that is still in an incipient situation in Brazil and developing countries [1].

On the other hand, dynamic phase-load balancing (PLB) is also used for the transformer phase imbalance problem, which through dynamic switching of FCUs in the LV grid phases, achieves the load instability elimination in the grid phases. The PLB is based mainly in a system of algorithms that produces an optimal combination of FCUs to minimize the load consumption [8].

In a particular way, the PLB is an important issue to the quality of energy providing service, and several direct algorithms were proposed [3], [7] which should now be arranged in an automated process. Thus, that process, forms a set for energy consumption management system (EMS) in the inner architecture of urban microgrids, produces a functional workflow for sub-processes such as the voltage evaluating stability and the load imbalance into FCU feeders, [8], within SG vision.

However, the aforementioned methods present, a great gap about the formal modeling for load balancing system design. They do not present workflow validation for the automated PLB process, [4].

Therefore, we suggest the Petri nets (PN) use to improve balancing process performance in the LV grid. That is, through formal modeling system is possible to obtain some process that improves PLB efficiency. PN represent in this work the structure and system architecture and workflow tasks and control in system.

This article, explains in second section background; the third section presents the proposal system model; in fourth section shows the system design in PN; the fifth section presents design validation analysis with operational workflow performance and its discussion; the last section presents the conclusion and future work lines.

2 | BACKGROUND

We have in this section, the background related research line of this work. First, we have specific review related load balancing algorithms development in LV grid. Then, we have also review about PN use in SG. It will address, some specific definitions of PN that will be important for the development of this proposal.

2.1 State of art

As load balancing method within PLB context, based on automatic load switching is an interesting approach for addressing the imbalance load in LV feeders and is an alternative technique to the legacy method used instead the power injection from microgrids [8]. This implies that overloaded single-phase FCU are switched to a feeder with a lower load level using some electronic switching device.

This uses a control algorithm to automate the load and electrical current minimization or voltage and load [4].

In this sense, we can mention the transfers overload concentrated technique (losses and loads) into specific feeder working from three-phase consumer FCU. This method is based on minimizing current consumption achieved by Fuzzy machine inference and Newton-Raphson's optimization algorithm, between power consumption and power variation in each feeder, [7].

There is, another method focused only on single-phase FCU, which minimizing power and voltage consumption using a hybrid genetic algorithm. In this case, also taking up load transfer but reconnecting single-phase FCU in same feeder in grid, with lower load level, [3].

Also, we can mention the hybrid load consumption algorithm model for FCU in LV grids, based on the Unified Modeling Language (UML)-PN paradigm, [5] which connects data acquisition, classification, programming, and consumption forecast, and sending best selection for arrangement switching feeders in load balancing.

In this paper, we will continue load balancing FCU phases model but based on hierarchical PN paradigm, using balancing diagnostic, current and load consumption prediction, minimization consumption and optimal arrangement sequence selection flow algorithms as hierarchical sub-processes in main PN.

Contributing, with achievement of efficient process in load balancing, which can be used as an alternative method and/or interface in existent LV grid and as support process in supervision center for an urban microgrids (UMG).

2.2 Definitions

2.2.1 Petri Net

A Petri net structure is a directed weighted bipartite graph, [6]:

$$N=(P,T,A,\omega) \tag{1}$$

where:

“P” is the finite set of places, $P \neq \emptyset$. “T” is the finite set of transitions, $T \neq \emptyset$. “A” \subseteq (PxT) U (TxP) is the set of arcs from places to transitions and from transitions to places.” ω ”: $A \rightarrow \{1,2,3..\}$ is the weight function of arcs.

2.2.2 Timed Petri Net

Defined by:

$$N=(P,T,A,\omega,M_0,F) \quad (2)$$

where: $N=(P,T,A,\omega,M_0)$ is a marked Petri net,[6], $f:T \rightarrow R^+$ is a firing time function that assigns a positive real number to each transition on the net.

2.2.3 Hierarchical Petri net by Place Bounded Substitution

Is defined by:

$$N=(P,T,F) \quad (3)$$

There is, an Y sub-net which limited by place so the replacement of this Y sub-net, generates another net. $N'=(P',T',F')$, where: i) $P' = P \setminus TU\{S_y\}$, S_y is the new element that replaces Y ; ii) $T' = T \setminus Y$; iii) $F' = F \setminus Int\{Y\}$, $Int(Y)$ is the inner Y arcs set, [6].

3 I PROPOSAL

Aiming to improvement the load balancing process in LV grid, we propose in this article: a model of an intelligent process for FCU load feeder balancing in urban microgrids, using a Timed Hierarchical Petri Net (THPN), in order to obtain reliably and efficiently workflow, formally validated.

The load balancing flow in current secondary grid, it is not scope of this work. Through, hierarchical PN will be performed validation of a new system design with inner sub-processes that make feeders reconfiguration, called “**DPMS**”, which is explained in following sub-section. At where, algorithms of each processes form a system and service that supporting the final consumers.

The Timed transitions use in proposal model are intended to represent the most realistic way possible an entire period, by simulation processing system for FCU feeders balancing. In this particular case, takes a granular period of 60 minutes, i.e., seeking feeder reconfiguration lasting one hour depending on sample consumption obtained at 10 minutes intervals derived from urban microgrid information system (which is not part of this work).

In this article, will be developed according to initial proposal of the authors, [5] but having as a contribution a broad and integrated PN with hierarchical description of its sub-process. It will be based on the system developed to FCU energy consumption diagnose, [4], however considering beyond imbalance diagnostic and consumption forecasting stage, more two stages: minimizing current consumption and switching sequence selection.

3.1 DPMS architecture

The proposed system is called “**DPMS**” because, of its four stages or sub-processes: “**Diagnose**”, “**Prevision**”, “**Minimization**” and “**Selection**”, each with a specific algorithm. So, these formed the **DPMS** system.

Thus, the DPMS system has an architecture formed as mentioned above, four specific processing (whose specific algorithms are not covered in this article):

- Balancing Diagnose or only “**D**” stage, that identifies the imbalance level in each feeder, noting two situations: “balanced feeder”, thus having the algorithm operating finish; and “imbalanced feeder” that activates the remaining stages of system, in sequence, starting with the consumption forecast step.
- Prevision Consumption or simply “**P**” stage, which only is activate when an imbalance is identified (in some feeder). Thus, it forecasts the current and energy consumption in feeders and returning this processing to the SG information system, that later develops the energy future consumption matrix, indicating the trend of consumption to the FCU.
- Minimization Consumption or just “**M**” stage, which procedure some combination of switching between feeders from the current and the future consumption of the energy and electrical current obtained by the “P” stage. Thus, in order to minimize power losses effects and ensuring the equilibrium state in feeders.
- Switching Sequence or only “**S**” stage, which chooses the best switching combination from the “M” stage. This selection is based on a correlation ratio analysis between the real value of consumption and with their values from the minimization stage. Thus, the final processing is sent to the information system SG as switching sequence, to procedure in fact the PLB process.

In Figure 1 it is shown the DPMS architecture system model, as support process for system information to supervision center in the Urban Microgrid environment. It can also be inserted, as an interface in the LV legacy grid system. Then, we have the operation flow of the DPMS system, which is shown in more details in Figure 2. Thus, this flow is started from consumption data processing, and after consumption diagnosis are identified possible losses and load imbalances.

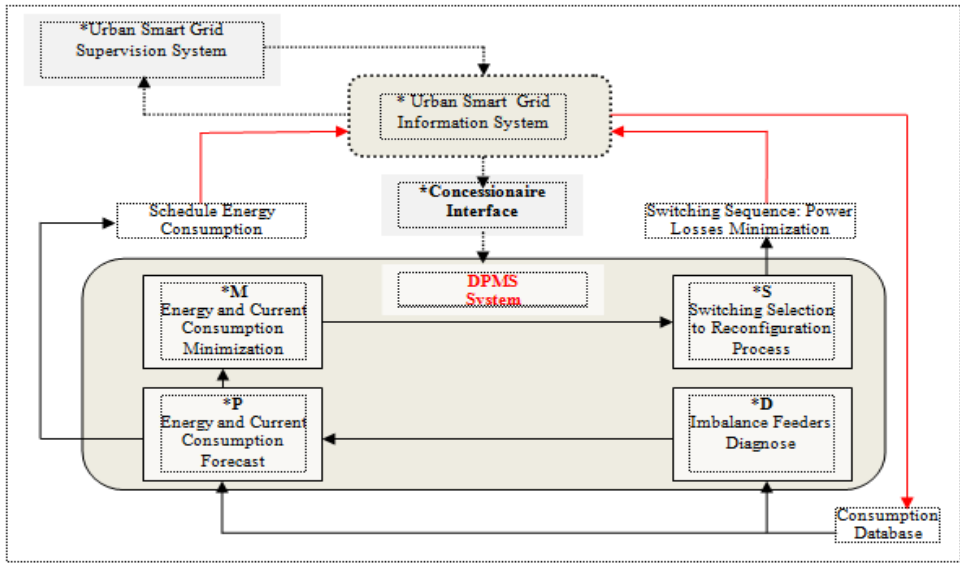


Figure 1. DPMS architecture.

In positive case, starts energy and current consumption prediction process, in each FCU feeder. The main objective is to obtain, the future consumption matrix of electrical current. Furthermore, the prediction results serve to supply the minimize consumption process.

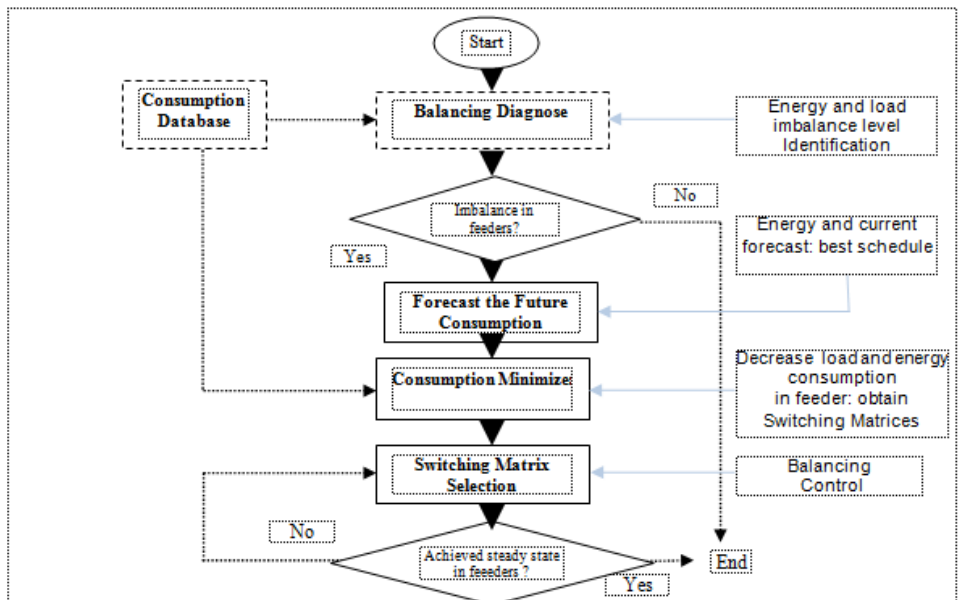


Figure 2. DPMS flowchart.

Followed by minimize consumption, looking for some sequences combinations of switching between feeders, which are calculated from current and future values of electrical current consumption. Finally, switching matrix selection chooses which through, send best combination for FCU feeders balancing implementation. If imbalance minimizing process ends, otherwise proceeds in choosing other combinations for switching.

4 | DPMS SYSTEM IN PETRI NETS

In Figure 3 it is shown the “DPMS” system modeling in THPN. So, it describes the main PN of DPMS system. The hierarchical extension used is place bounded substitution (PBS) according to *definition 2.2.2*.

It is shown, the places that give sub-processes in main PN, that are described later in details. The DPMS system is connecting with an Urban Microgrid environment, which is compound of the Supervision Center, the Feeders Switching Control, and the Consumption Data Record.

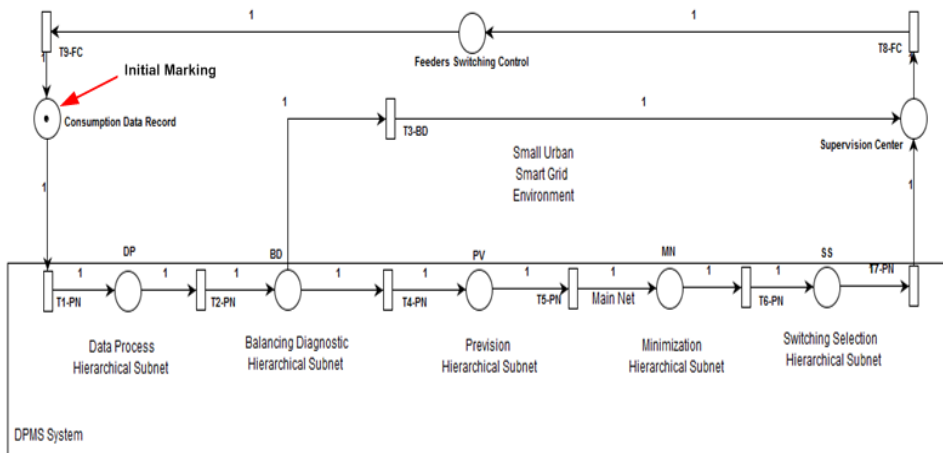


Figure 3. DPMS in THPN: Main Petri net.

Thus, system is activated through load balancing check application requirement in FCU feeders, activated by the Supervision Center of the Urban Microgrid.

The inner workflow of DPMS system is formed as follows (see Figure 5):

- “**DP**”. Data Process hierarchical subnet. Which has all statistical treatment sub-processes. It is formed by: “ L_1 -DP”, that classifies power, current and energy consumption data. “ L_2 -DP”, which calculates average consumption. “ L_3 -DP”, that forms discrete consumption states.
- “**BD**”. Balancing Diagnose hierarchical subnet. It contains: “ L_4 -BD”, which inserts

load and energy consumption as input variables in inference system."L₅-BD", that inserts load and energy consumption variation as input variable."L₆-BD", which inserts current consumption as output variable."L₇-BD" inserts inference rules."L₈-BD" obtain conditions to imbalance diagnose. BD exit has two conditions: FCU balanced "T₁₃-BD" and, No balanced FCU "T₁₄-BD".

- **"PV"**. Prevision hierarchical subnet, with electrical current consumption sub-processes. It is formed by:"L₉-PV", which inserts discrete states consumption."L₁₀-PV", that calculates incidences consumption."L₁₁-PV", which obtain transition matrix."L₁₂-PV", that obtain forecast electrical current consumption.
- **"MN"**. Minimization hierarchical subnet. It is formed by:"L₁₃-MN", which inserts measured electric current vector."L₁₄-MN", that inserts forecast current vector."L₁₅-MN", which forms minimization consumption vector."L₁₆-MN", that inserts minimization consumption formula."L₁₇-MN" which obtain the arrangement switching matrices.
- **"SS"**. Switching Selection hierarchical subnet. It contains:"L₁₈-SS", that inserts switching matrix values and correlation degree between forecast and measurement current, as like input variables in inference system."L₁₉-SS", which inserts load consumption as output variable."L₂₀-SS", that inserts inference rules."L₂₁-SS", which selects optimal switching matrix. After, this ow goes to supervision center (CS), and then feeder switching control (FC). The process goes through a measurement by data measurement (DM), whose ow is transferred as consumption data record (CDR).

5 I RESULTS -VALIDATION ANALYSIS

In this section, it will show the validation results of DPMS system, modeled in THPN, using reachability graph, invariant analysis applied in Main DPSN THPN and besides in Hierarchical DPMS THPN. Which shown all processes of system and in addition, the siphon use, and traps analysis for validation workflow. For experimental results, was used as tool a free version of Pipe 4.3.0. For simulation, timed transitions are used. It is distributed fixed time intervals, for each operation of sub-process, it was used T = 10 seconds, and for total integration operations add up to a full period of T = 60 seconds.

5.1 Main dpms in thpn validation

a) Reachability Graph

The Main DPMS Reachability graph is shown in Figure 4. So, it represents the PN reachable diagram obtained from its initial state "S₀" highlighted in red, that also represents initial marking of PN.

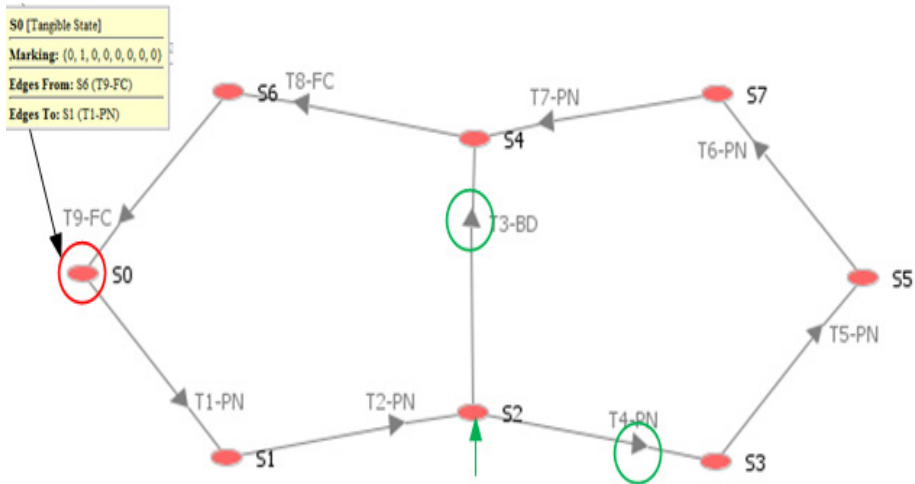


Figure 4. Main DPMS: Reachability Graph.

Through Main DPMS simulation, is verified that does not exist Deadlock. However, checking a possible conflict highlighted with a black arrow on “S2” BD place output, between transitions “T7-BD” and “T8-PN”, due to balancing result that evaluates two conditions: balanced FCU or unbalanced FCU.

However, this “conflict”, will not be controlled due to consider a random order in system simulation, when it executes the feeders balancing procedure.

b) Invariants Analysis

Still looking for reachability graph, we note that all processes of system are sequential. However, the BD process is the most critical because to determine the end of process, if it is found that FCU feeders are balanced, or the continuation of process otherwise, activating PV process.

This condition form, a specific place invariant: “PV” sub-process cannot happen before “BD” sub-process. But also, we have the follow condition invariant: “BD”, “PV”, “MN”, “SS” places cannot happen before “DP” sub-process. Thus, we have the follow condition: DP marking, BD marking, PV marking, MN marking and SS marking, should be equal to 1, according to equation (4):

$$M(DP) + M(BD) + M(PV) + M(MN) + M(SS) = 1 \tag{4}$$

In a similar situation, but starting from “BD” should also be considered the follow place invariants: “Supervision Center (SC)”, “Feeder Switching Control (FC)”, “Consumption Data Record (CDR)”. Thus, these places cannot happen before “BD” sub-process. If any as a result of the process, FCU balanced, according to equation (5):

$$M(BD) + M(SC) + M(FC) + M(CDR) = 1 \tag{5}$$

Besides, by P-Invariants result, is verified that this workflow is true:

$$M(BD) + M(Consumption\ Data\ Record) + M(DP) + M(Feeders\ Switching\ Control) + M(MN) + M(PV) + M(SS) + M(Supervision\ Center) = 1 \quad (6)$$

5.2 Hierarchical dpms in thpn validation

In Figure 5 it is shown the Hierarchical DPMS THPN simulation. Were performed 1500 “firings” with a period of 60 seconds between each, in order to have a complete operating in 1 minute. Thus, is considered 60 FCU in an Urban Microgrid to be targets of balancing feeders analysis process. Thus, in “CDF” place there are electrical current and energy consumption of 60 FCUs.

During DPMS system simulation is verifying efficiently workflow, and there is not deadlock or conflicts (marked in green in Figure 7) like main PN, that needs regulatory control. However, it is found some “traps focus” especially on “BDout” (in red), where are accumulated and consumed several tokens continuously, but it normalizes and adjusts over time. Besides, it is, also found some “siphons focus” in “No Balanced FCU”, where which are accumulated several tokens, but this is actually equal to “No balanced FCU”(in green): both are only process counters, to facilitate processing system count. In addition, the DPMS THPN Reachability graph is shown in Figure 6.

It represents the diagram of reachable states of the PN. Its initial state “S₀” highlighted in red.

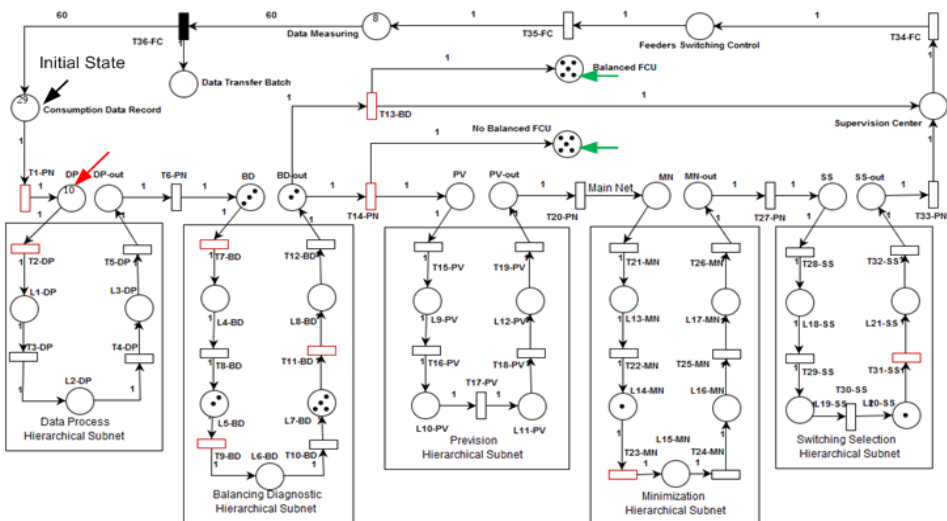


Figure 5. DPMS in THPN Simulation.

It is verified that does not exist Deadlock, and that the PN it might be bounded and liveness. In addition, looking for reachability graph in Figure 6, it is observed that all some

Through the net synthesis, the reachability graph, invariant analysis, and workflow simulation, among others the vividness and limited network properties were checked. Verifying in summary efficiently operation of system without deadlocks and conflicts, that requested implementation of any regulatory control.

Suggested future steps develop model DPMS system using timed hierarchical colored Petri nets, to further improve computational efficiency.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors thank UEA, UFPA, USP and FAPEAM, for allowing scientific achievement of this proposal.

REFERENCES

1. El-Hendawi M.; Gabbar H.; El-Saady G.; Ibrahim E.N. **Control and EMS of a grid-connected microgrid with economical analysis**. Energies, 2018, Vol. 11, N°1, p.129.
2. Ma T.; WU J.; NIU X. **Reliability assessment indices and method for urban microgrid**. CIREED-Open Access Proceedings Journal, 2017, Vol. 1, pp.837-840.
3. Shahniah F.; Wolfs J.; Ghosh A. **Voltage Unbalance Reduction in Low Voltage Feeders by Dynamic Switching of Residential Customers Among Three Phases**. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, Vol, 5, N°3, pp.1318-1327.
4. Sicchar, J. R.; da Costa, C. T.; Silva, J. R. and de Freitas, R. C. **Gerenciamento de Consumo de Energia em Residências com Frame GCR**, Proc. in XII SBAl, Natal, 25-28 outubro, SBA, UFRN, Natal, RN, Brasil, 2015, pp.1-6.
5. Sicchar, J. R.; Tavares, C.; Salmon, A. O.; Silva, J. R.; Pina, I. F.; and Gomes, R.C. **Sistema Inteligente para Análise de Consumo de Energia Elétrica em Smart Grid de Baixa Tensão**, Proc. in X SBAl, São João del Rei, 18-21 setembro, SBA, UFSJ, São João del Rei, MG, Brasil, 2011 pp. 1-6.
6. Silva, J. R.; and del Foyo, P. G. **Timed Petri Nets**. Chapter 16. Petri Nets: Manufacturing and Computer Science, Intech, Pawel Pawlewski ed, 2012, pp. 359-378. ISBN: 958-953-51-0700-2.
7. Siti M. W.; Jimoh A.A.; Nicolae D.V. **Distribution network phase load balancing as a combinatorial optimization problem using fuzzy logic and Newton-Raphson**. Electric Power Systems, Elsevier, 2011, Vol, 22, N°4, pp.1079-1087.
8. Vuluvala M.R.; Saini L.M. **Load balancing of electrical power distribution system: An overview**. Proc in the 2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), Thrissur, 18-20 janeiro, IEEE, India, 2018, pp. 1-5.
9. Xu Z.; Zhang Y.; Liang Y.; Zeng Z.; Yang P.; Peng J.; He T.; Chen J. **Multi-timescale coordinated optimization of hybrid three-phase/single-phase multimicrogrids**. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(3), p.e2499.

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