

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

CAPÍTULO 1

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

Data de aceite: 01/06/2021

Joelson Lopes da Paixão

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

Mauro Fonseca Rodrigues

Doutor em Engenharia Elétrica
Unipampa - Campus Alegrete
Alegrete - RS

José Oizimas Junior

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

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

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

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

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

KEYWORDS: Synchronization of distributed

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

1 | INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

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

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

2 | TRANSFORMADAS DE CLARKE E PARK

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

A) Transformada de Clarke

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

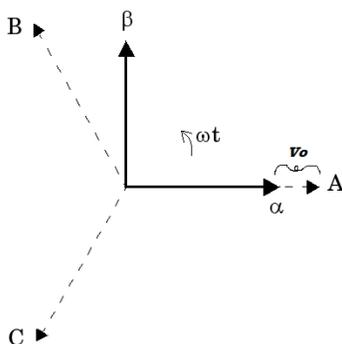


Figura 1: Transformada de Clarke [2] [4].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

B) Transformada de Park

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

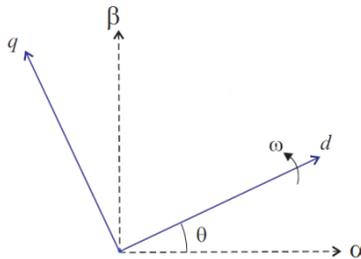


Figura 2: Transformada de Park [2] [4].

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

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

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

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

C) Princípio de operação do PLL

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

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

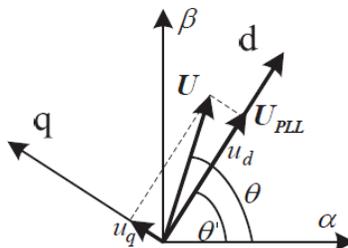


Figura 3: Diagrama do princípio de operação do PLL [5].

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

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

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

3 I PROPOSTA DE TOPOLOGIA PLL PARA A SINCRONIZAÇÃO

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

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

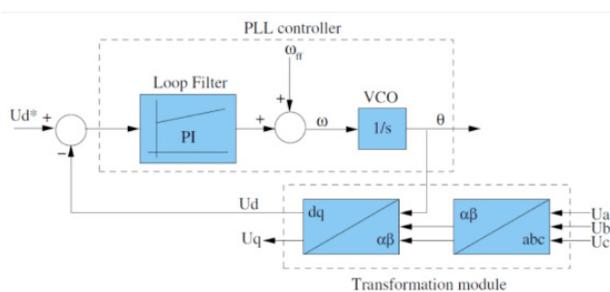


Figura 4: Topologia do algoritmo de controle do PLL [6].

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

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

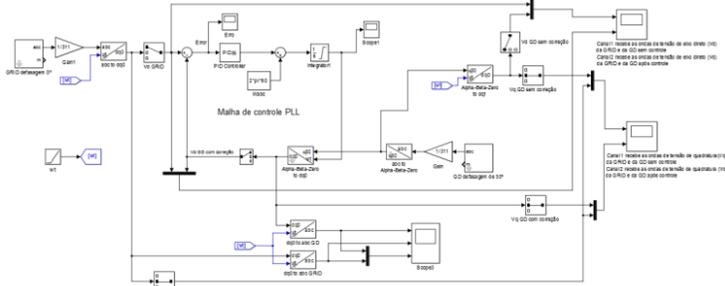


Figura 5: Topologia completa de simulação.

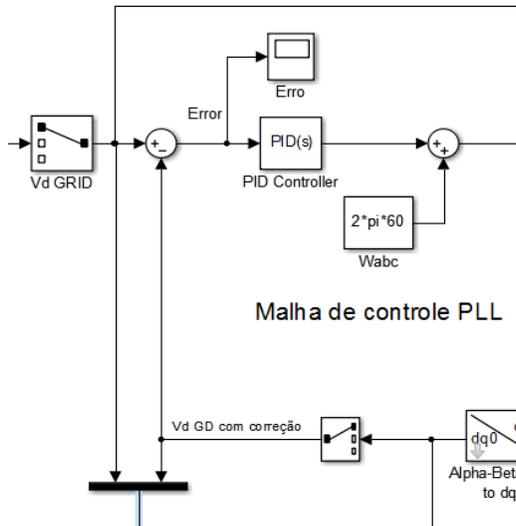


Figura 6: Sistema de correção com controlador PID.

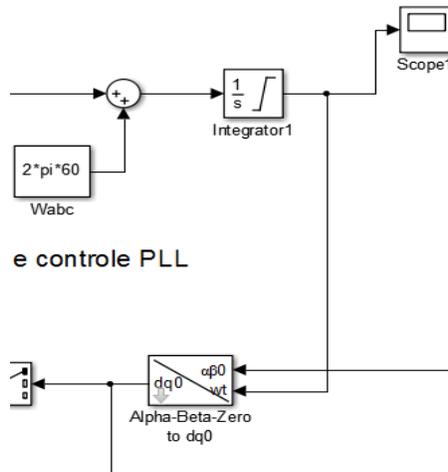


Figura 7: integrador para sincronismo GD – GRID.

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

A) Acoplamento

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

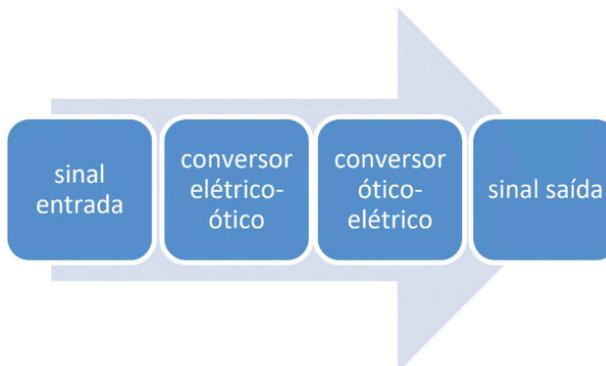


Figura 8: Esquema do acoplamento ótico.

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

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

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

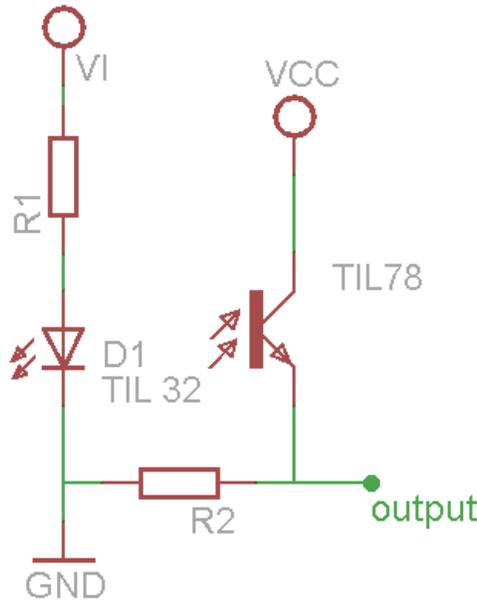


Figura 9: Diagrama de um acoplamento ótico [8].

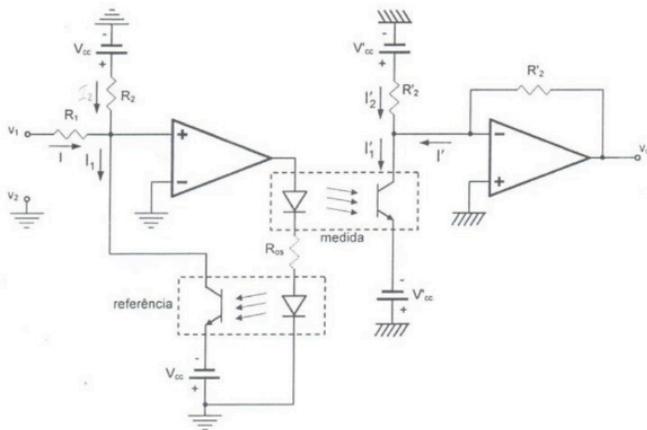


Figura 10: Circuito amplificador com isolamento ótico [9].

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

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

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

B) GD com Fonte Hidráulica

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

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

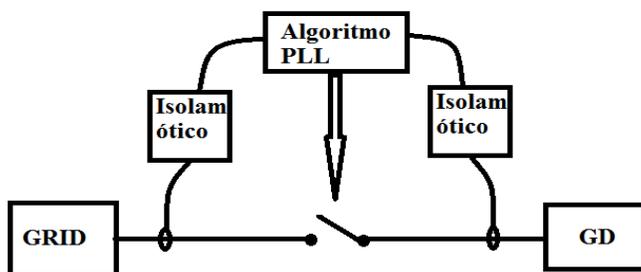


Figura 11: Esquema do processo de sincronismo entre a rede e a GD.

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

ambiente totalmente controlado.

4 | RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS TESTES

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

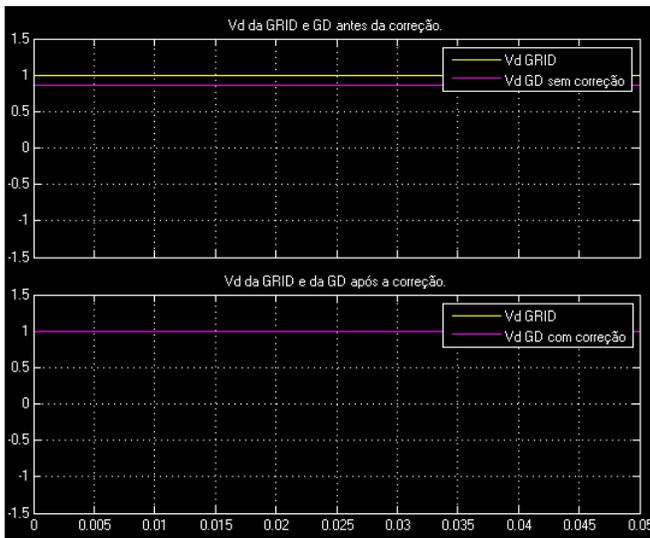


Figura 12: Sinais de Vd da GRID e da GD antes e após a correção

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

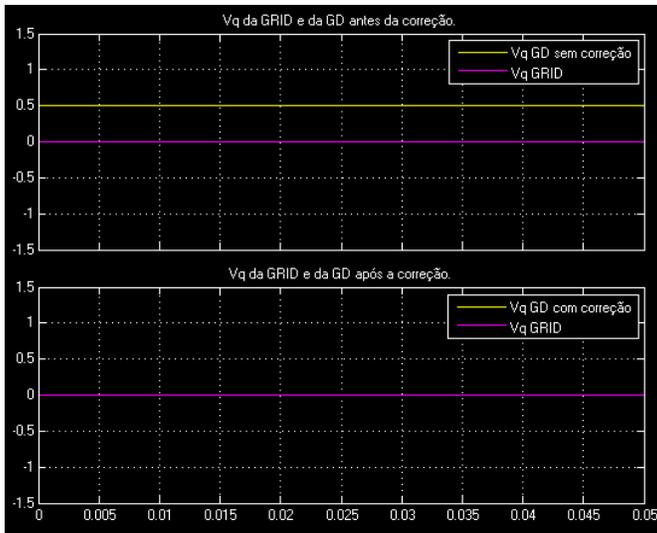


Figura 13: Sinais de V_q da GRID e da GD antes e após a correção.

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

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

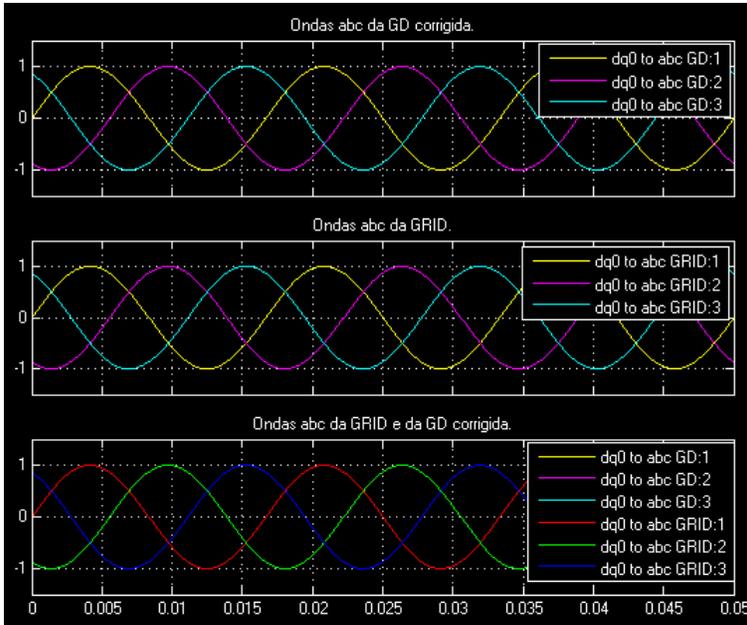


Figura 14: Ondas de tensão *abc* da GRID, da GD e de ambas juntas após a correção.

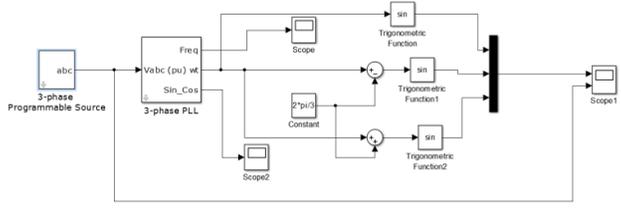


Figura 15: Controlador PLL aplicado.

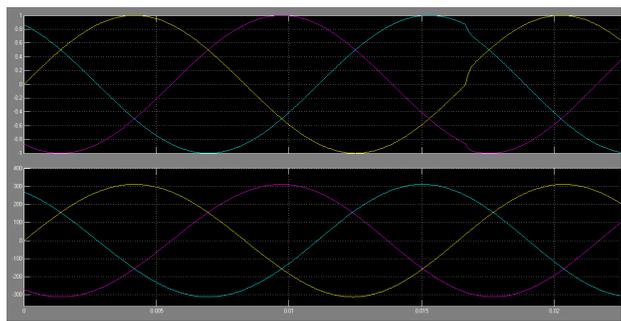


Figura 16: Resultados obtidos pelo filtro PLL após inserção de harmônicas.

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

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

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

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

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

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

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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 26/04/2021

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/1231733785708599>

Cristiane Lionço Zeferino

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/0915594224998333>

Leandro Antonio Pasa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/4095187669845473>

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Faculdade de Ensino Superior de São Miguel
do Iguaçu
São Miguel do Iguaçu – PR
<http://lattes.cnpq.br/8402032745107959>

Eduarda Abatti Dahlem

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/9448912058710598>

RESUMO: A análise do fluxo de potência é uma ferramenta indispensável na determinação das condições operativas em regime permanente de um Sistema de Energia Elétrica. Convencionalmente, o problema de fluxo de potência tem sido resolvido de maneira satisfatória através do método de Newton-

Raphson. No entanto, alguns autores afirmam que pelo fato deste método ter sido desenvolvido com base nas características típicas dos Sistemas de Transmissão de Energia, pode apresentar problemas de convergência quando aplicado em certos Sistemas de Distribuição de Energia. Por esta razão, têm sido desenvolvidos alguns métodos de fluxo de potência que contemplam exclusivamente as particularidades dos Sistemas de Distribuição de Energia, sendo o método de Soma de Correntes o mais referenciado. Neste trabalho, com o intuito de verificar a aplicabilidade do método de Newton-Raphson como solução do problema de fluxo de potência em Sistemas de Distribuição de Energia balanceados é realizada uma análise comparativa entre os métodos de Newton-Raphson e o método de Soma de Correntes. Para tal fim, são determinados os pontos de operação de três sistemas-teste sob a influência de vários cenários: a) diferentes níveis de carregamento. b) inserção de geração distribuída e c) variação na relação X/R das Linhas de Transmissão. Os resultados obtidos mostram que o método de Newton-Raphson pode ser usado para resolver o problema de fluxo de potência em Sistemas de Distribuição de Energia.

PALAVRAS-CHAVE: Fluxo de Potência, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Método de Newton-Raphson, Método de Soma de Correntes.

A COMPATATIVE STUDY BETWEEN NEWTON-RAPHSON AND CURRENT SUMMATION METHOD FOR LOAD FLOW IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

ABSTRACT: The load flow analysis is an essential tool to evaluate the steady-state operating conditions of an Electric Power System. Conventionally, the load flow problem has been successfully solved using the Newton-Raphson method. However, whereas this method has been developed for Electric Transmission Systems, some studies suggest that the Newton-Raphson method can present convergence problems when applied to Electric Distribution Systems. For this reason, several load flow approaches have been proposed exclusively for Electric Distribution Systems, among which stand out the Current Summation method. In this work, in order to verify the applicability of the Newton-Raphson method to obtain the load flow solution for balanced distribution systems, a comparative study between Newton-Raphson method and Current summation method is performed. For this purpose, the power system operation point of three test system is analyzed under the influence of various scenarios: a) different loading levels. b) insertion of distributed generation and c) variation of X/R ratio of Transmission Lines. The results obtained show that the Newton-Raphson method can be used to successfully solve the load flow problem in Electrical Distribution Systems.

KEYWORDS: Power System Load Flow, Electrical Power Distribution System, Newton-Raphson Method, Current Summation Method.

1 | INTRODUÇÃO

Devido à crescente expansão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), a sua operação e monitoramento tornam-se cada vez mais complexos, sendo necessário realizar diferentes interligações elétricas e o desenvolvimento de novas e melhores técnicas de análise computacional. Dada sua complexidade, os SEP podem ser divididos em três grandes áreas: Sistema de Geração de Energia Elétrica (SGEE), Sistema de Transmissão de Energia Elétrica (STEE) e Sistemas de Distribuição de Energia (SDEE). Nestas áreas existem diferentes abordagens caracterizadas pela sua complexidade matemática, tais como: despacho econômico, localização de faltas, fluxo de potência, estimação de estado, previsões de demanda, entre outros (SAADAT, 1999; GRAINGER, 1994).

Para que um SEP opere da melhor maneira possível, dentro dos limites operacionais requeridos, melhores ferramentas de planejamento e operação são requeridas no desenvolvimento de sua instalação e expansão. Nestes casos, os estudos de fluxo de potência são de enorme importância na determinação das condições de operação em regime permanente de um SEP (MONTICELLI, 1983). Os resultados desses estudos são obtidos a partir da resolução de um conjunto de equações algébricas não-lineares e servem como ponto de partida para a execução de outras análises (MONTICELLI, 1999; GOMEZ-EXPÓSITO, 2009).

Tradicionalmente, o método de Newton-Raphson e suas versões desacopladas têm sido empregados satisfatoriamente na resolução do problema do fluxo de potência. Estes

métodos, que foram desenvolvidos considerando principalmente as características típicas dos STEE, caracterizam-se por usar uma formulação matricial e um procedimento iterativo de rápida convergência, motivo pelo qual são amplamente divulgados nas análises de SEP (MONTICELLI, 1983).

Segundo o anterior, é possível usar o método de Newton-Raphson para realizar estudos de fluxo de potência em SDEE (WASLEY, 1974; ZHANG, 1997). No entanto, alguns autores não recomendam usar este método, já que, os SDEE possuem características diferenciadas, tais como, topologia radial ou fracamente malhadas, operação multifísica e desequilibrada, cargas desbalanceadas e dispersas e presença de geração distribuída (GD), entre outras (CESPEDES, 1990; SHIRMOHAMMADI, 1995). Adicionalmente, estudos apontam que a relação típica X/R dos SDEE pode causar problemas de convergência ao usar os métodos de Newton-Raphson para realizar análises de fluxo de potência em SDEE (SHIRMOHAMMADI, 1988; CHIANG, 1991; MURUGANANTHAM, 2016).

De acordo com o anterior e considerando algumas limitações computacionais da época, no início dos 90 vários métodos de fluxo de potência foram propostos exclusivamente para SDEE, denominados métodos de varredura (SHIRMOHAMMADI, 1988; BARAN, 1989; CESPEDES, 1990; GOSWANI, 1992). Esses métodos apresentam um desempenho eficiente, pois, não usam formulações matriciais de grande porte e não precisam de inversão de matrizes para atualização das variáveis de estado, o que representa uma vantagem computacional quando comparados com o método de Newton-Raphson.

Dentre os métodos de varredura propostos destaca-se o método de Soma de Correntes (SHIRMOHAMMADI, 1995). Este método tem a vantagem de usar um procedimento simples para determinar o ponto de operação de um SDEE, onde as variáveis de estado são atualizadas iterativamente através de varreduras desde as barras extremas até a subestação e vice-versa. Além disso, pela fácil implementação computacional e simplicidade, o método de Soma de Correntes é um dos métodos mais usados na resolução de problemas em SDEE (BARAN, 1995; BARAN, 1997; CIRIC, 2003; FRANCO, 2013).

Em suma, embora o método de Newton-Raphson seja o procedimento mais empregado nos estudos de fluxo de potência em STEE existem algumas dúvidas sobre a sua aplicabilidade nos SDEE. Portanto, neste trabalho é proposto realizar uma análise do desempenho do método de Newton-Raphson quando aplicado em SDEE balanceados. Para avaliar o comportamento do método de Newton-Raphson são realizadas algumas alterações nos sistemas-teste IEEE 13, 37 e 69 barras, de tal forma que, possa ser analisado o desempenho do método diante dos diferentes cenários de operação propostos. Estes cenários compreendem diferentes níveis de carregamento, a inserção de GD e o impacto da relação X/R nas linhas de transmissão (LT). Por fim, os resultados obtidos pelo método de Newton-Raphson são validados através de uma análise comparativa com o método de Soma de Correntes. Desta forma, a partir dos resultados obtidos neste artigo determina-se a aplicabilidade do método de Newton-Raphson na solução do problema de

fluxo de potência em SDEE.

2 I FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS MÉTODOS DE NEWTON-RAPHSON E SOMA DE CORRENTES

O equacionamento dos métodos de Newton-Raphson e de Soma de Correntes usados nas análises de fluxo de potência são mostrados a seguir.

2.1 Método de newton-raphson

Na formulação básica do método de Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983; GRAINGER, 1994), cada barra do SEP pode ser correlacionada a quatro variáveis: magnitude de tensão (V_k), ângulo de tensão (θ_k), potência ativa líquida ($P_k = P_k^G - P_k^D$) e de potência reativa líquida ($Q_k = Q_k^G - Q_k^D$). Dentre estas grandezas, dependendo do tipo de barra, algumas são inseridas no problema como incógnitas e outras como dados de entrada, como mostrado a seguir:

- Barra de referência ($V\theta$): Nesta barra V_k , θ_k , P_k^D e Q_k^D devem ser especificadas, enquanto que, P_k^G e Q_k^G são incógnitas.
- Barra de carga (PQ): Nesta barra não há geração ($P_k^G = Q_k^G = 0$), as potência P_k^D e Q_k^D devem ser especificadas, enquanto que, V_k e θ_k são incógnitas.
- Barra controlada por tensão (PV): Nesta barra P_k^G , P_k^D , Q_k^D e V_k devem ser especificadas, enquanto que, Q_k^G e θ_k são incógnitas.

Desta forma, a partir da entrada dos dados das LT e das barras do SEP, na iteração são calculadas as potências ativas nas barras PQ e PV e as potências reativas nas barras PQ, conforme equações (1) e (2):

$$P_k^{(v)} = V_k^{(v)2} G_{kk} + V_k^{(v)} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m^{(v)} (G_{km} \cos \theta_{km}^{(v)} + B_{km} \sin \theta_{km}^{(v)}) \quad (1)$$

$$Q_k^{(v)} = -V_k^{(v)2} B_{kk} + V_k^{(v)} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n V_m^{(v)} (G_{km} \sin \theta_{km}^{(v)} - B_{km} \cos \theta_{km}^{(v)}) \quad (2)$$

Em seguida, calculam-se através os resíduos das potências através das equações (3) e (4):

$$\Delta P_k^{(v)} = P_k^{esp} - P_k^{(v)} \quad (3)$$

$$\Delta Q_k^{(v)} = Q_k^{esp} - Q_k^{(v)} \quad (4)$$

Se o maior valor dos resíduos calculados em (3) e (4) estiver abaixo da tolerância

adotada, o processo iterativo atingiu a convergência para a solução $(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)})$. Caso contrário, o processo iterativo segue com a determinação da matriz Jacobiana do sistema, e posteriormente, a resolução do sistema de equações representado pela equação (5):

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_k^{(v)} \\ \Delta V_k^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) & N(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) \\ M(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) & L(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_k^{(v)} \\ \Delta Q_k^{(v)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde os elementos das matrizes H , N , M e L contêm as derivadas parciais das equações P_k e Q_k em função das variáveis V_k e θ_k . Finalmente, através da equação (6) são atualizados os valores de $(V_k^{(v)}, \theta_k^{(v)})$.

$$\begin{bmatrix} \theta_k^{(v+1)} \\ V_k^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_k^{(v)} \\ V_k^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta_k^{(v)} \\ \Delta V_k^{(v)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

O processo iterativo continua até satisfazer a condição de convergência.

2.2 Método de soma de correntes

O método de Soma de Correntes caracteriza-se pelo uso de um equacionamento diferente ao usado pelo método de Newton-Raphson onde as variáveis de estado do sistema são atualizadas iterativamente através de varreduras desde as barras extremas até a subestação e vice-versa. Geralmente, estas varreduras são chamadas de varredura reversa (à montante) e varredura direta (à jusante), respectivamente. Esses caminhos à montante e à jusante são traçados após realizar um ordenamento em camadas do SDEE.

De forma similar ao método de Newton-Raphson, neste método são definidos quatro variáveis para cada tipo de barra: V_{kr} , V_{ki} , I_{kr} e I_{ki} . No entanto, há uma série de diferenças significativas em relação ao método de Newton-Raphson, pois, para determinar o ponto de operação deve ser possível calcular I_{kr} e I_{ki} em todas as barras do SDEE. Por esta razão, faz-se necessário implementar um procedimento chamado de método de compensação de reativos que possibilita a representação das barras PV nas análises de fluxo de potência (SHIRMOHAMMADI, 1995).

A formulação do método de Soma de Correntes é obtida a partir do cálculo das injeções de correntes nas barras do SEP, conforme a equação (7):

$$I_k^{(v)} = \left(\frac{S_k}{V_k^{(v)}} \right)^* - Y_k^{sh} V_k^{(v)} \quad (7)$$

Após simplificar a expressão anterior e separando a parte real da parte imaginária, obtêm-se as equações (8) e (9):

$$I_{kr}^{(v)} = \frac{P_k V_{kr}^{(v)} + Q_k V_{ki}^{(v)}}{(V_{kr}^{(v)})^2 + (V_{ki}^{(v)})^2} + Y_k^{sh} V_{ki}^{(v)} \quad (8)$$

$$I_{ki}^{(v)} = \frac{P_k V_{ki}^{(v)} - Q_k V_{kr}^{(v)}}{\left(V_{kr}^{(v)}\right)^2 + \left(V_{ki}^{(v)}\right)^2} - Y_k^{sh} V_{kr}^{(v)} \quad (9)$$

A partir de (8) e (9) e usando a varredura reversa podem ser calculadas as correntes $J_{mk_r}^{(v)}$ e $J_{mk_i}^{(v)}$, $\forall mk \in \Omega L$, tal como mostrado a seguir nas equações (10) e (11):

$$J_{mk_r}^{(v)} = -I_{kr}^{(v)} + \sum_{kl \in \Omega L} J_{kl_r}^{(v)} \quad (10)$$

$$J_{mk_i}^{(v)} = -I_{ki}^{(v)} + \sum_{kl \in \Omega L} J_{kl_i}^{(v)} \quad (11)$$

Em seguida, realizando a varredura direta são calculadas as tensões nas barras através das equações (12) e (13):

$$V_{kr}^{(v)} = V_{mr}^{(v)} - r_{mk} J_{mk_r}^{(v)} + x_{mk} J_{mk_i}^{(v)} \quad (12)$$

$$V_{ki}^{(v)} = V_{mi}^{(v)} - r_{mk} J_{mk_i}^{(v)} - x_{mk} J_{mk_r}^{(v)} \quad (13)$$

A partir destas equações, calcula-se em cada iteração os erros entre as potências calculadas e as potências especificadas, tal como segue nas equações (14) e (15):

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{(v)} \quad (14)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{(v)} \quad (15)$$

Onde $P_k^{(v)}$ e $Q_k^{(v)}$ podem ser calculados a partir da equação (16):

$$S_k^{(v)} = \left(V_{kr}^{(v)} + jV_{ki}^{(v)}\right) \left(I_{kr}^{(v)} + jI_{ki}^{(v)}\right)^* - Y_k^{sh} |V_k| ^2 \quad (16)$$

O processo iterativo continua até satisfazer a condição de convergência.

3 I CENÁRIOS DE OPERAÇÃO PROPOSTOS

Três cenários de operação foram estabelecidos para cada um dos sistemas-teste com o intuito de comparar os resultados dos métodos de Newton-Raphson e Soma de Correntes sob a influência de diferentes níveis de carregamento, inserção de GDs e a variação da relação X / R nas LT. Os principais aspectos destes cenários são descritos a seguir:

- Níveis de carregamento: As faixas de variação das tensões consideradas baseiam-se nos valores de tensão em regime permanente estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021), para a faixa de tensão superior a 1 kV e inferior a 69 kV, conforme a Tabela 1:

Carga	Faixa de variação de tensão
Leve	$\geq 0,93$
Média	$\geq 0,90$ e $< 0,93$
Pesada	$< 0,90$

Tabela 1. Faixas de variação de tensão para cada tipo de carga

Os diferentes níveis de carregamento foram determinados a partir da multiplicação das cargas dos sistemas-teste por uma constante de carga k . Os valores para as constantes são elucidadas na Tabela 2.

Carga	Sistema-teste		
	SDEE 13 barras	SDEE 37 barras	SDEE 69 barras
Leve	1	1	1/5
Média	10	25	1/3
Pesada	15	35	1/2

Tabela 2. Valores da constante k para cada sistema-teste

Esses valores foram determinados, de tal forma que, os valores mínimos das menores tensões se enquadrem nas faixas de tensão especificadas na Tabela 1.

- Inserção de GD: Para alocar GDs nas barras no sistema é usado o perfil de tensões nos barramentos. Neste contexto, nos sistemas-teste têm sido alocados GDs, de modo que, as tensões apresentem valores acima de 0,93 p.u.
- Variação da relação X/R das LT: Os condutores elétricos apresentam uma relação X/R típica entre 2,5 e 30 para STEE, enquanto que para SDEE a relação X/R corresponde a valores entre 0,3 e 3 (CARVALHO, 2006; LODDI, 2010). Com base nisso, os valores das reatâncias das LT são alterados para 5, 3, 0,3 e 0,05 vezes a resistência, considerando um cenário de carregamento pesado. Essas alterações foram realizadas inicialmente nos trechos localizados na região central de cada um dos sistemas-teste e posteriormente, nos trechos à montante das barras que apresentaram tensões menores que 9 pu. Por fim, tais alterações foram efetuadas para todas as linhas dos sistemas-teste.

Cabe salientar que com a criação destes cenários de operação é possível validar se o método de Newton-Raphson consegue determinar satisfatoriamente o ponto de operação dos SDEE.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que a comparação entre os métodos de Newton-Raphson e de Soma

de Correntes possa ser realizada, faz-se necessário realizar as seguintes alterações nos sistemas-teste usados na simulação (KERSTING, 2001): foram consideradas as impedâncias próprias das LT, os transformadores foram substituídos por sua impedância série e os reguladores de tensão e capacitores shunt foram desconsiderados.

Visando que os métodos de fluxo de potência sejam comparados de maneira eficaz, esses algoritmos foram implementados em uma mesma plataforma de programação, levando em consideração os mesmos parâmetros de convergência. Dessa forma, o MATLAB® foi o software escolhido e a tolerância admitida foi de 1×10^{-6} . Nesse contexto, as comparações propostas são apresentadas a seguir.

4.1 Diferentes níveis de carregamento

As respostas obtidas pela solução fluxo de potência para os sistemas-teste SDEE 13, 37 e 69 barras, levando em consideração os diferentes cenários de carregamento, são apresentadas na Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3, respectivamente.

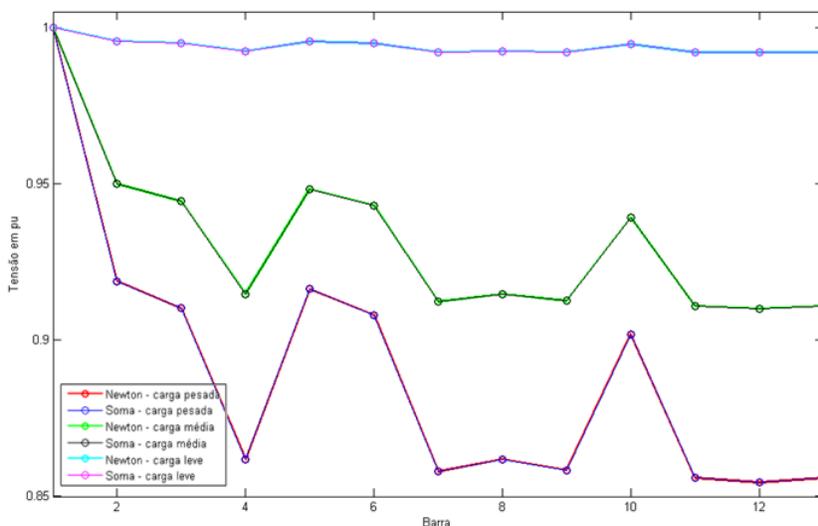


Fig. 1: Sistema-teste de 13 barras - Diferentes níveis de carregamento

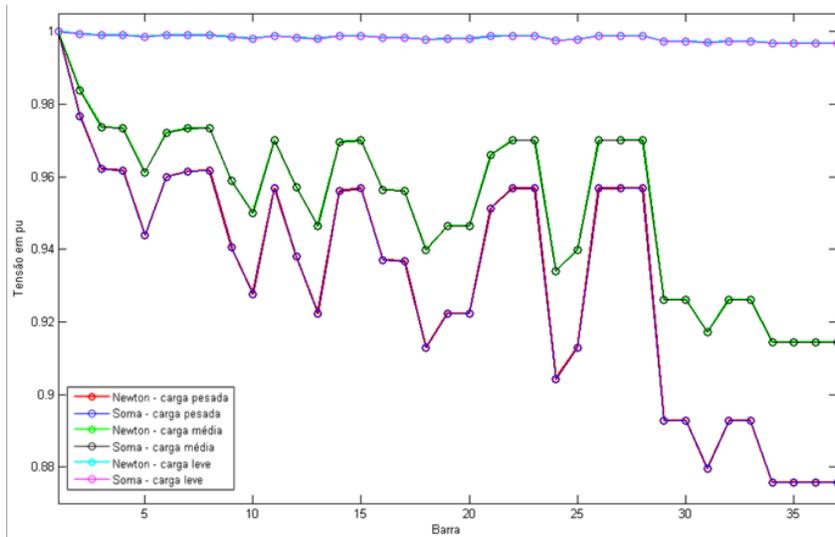


Fig. 2: Sistema-teste de 37 barras - Diferentes níveis de carregamento

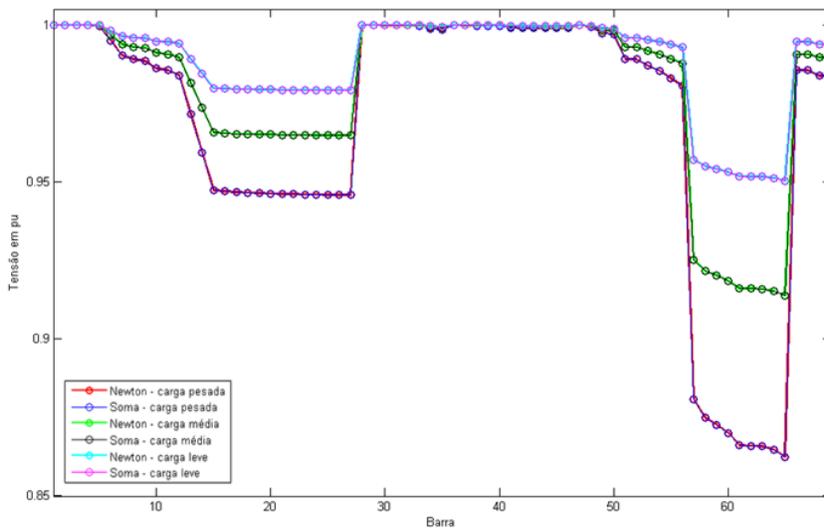


Fig. 3: Sistema-teste de 69 barras - Diferentes níveis de carregamento.

Pode-se apreciar nas figuras anteriores que os métodos de fluxo de potência convergem no mesmo ponto de operação para os três cenários contemplados. O anterior pode ser validado ao comparar os máximos desvios das tensões (módulo e ângulo) e os desvios das perdas de potência mostradas na Tabela 3 para o cenário de carga pesada (tomando como referência os resultados do método de Soma de Correntes).

<i>Sistema-teste</i>	<i>SDEE 13 barras</i>	<i>SDEE 37 barras</i>	<i>SDEE 69 barras</i>
Máximo desvio dos módulos (p.u)	$1,0109e^{-8}$	$3,4142e^{-9}$	$1,4720e^{-5}$
Máximo desvio dos ângulos (graus)	$5,2269e^{-7}$	$1,2845e^{-8}$	$7,5459e^{-5}$
Desvio das perdas de potência ativa (p.u)	$2,5435e^{-7}$	$1,0670e^{-7}$	$3,1265e^{-7}$
Desvio das perdas de potência reativa (p.u.)	$7,7739e^{-7}$	$6,2119e^{-8}$	$3,8783e^{-8}$

Tabela 3. Resultados para o cenário de carga pesada

Nas simulações realizadas percebe-se que o número de iterações aumenta conforme a demanda dos sistemas-teste é incrementada, assim como o tempo computacional, como pode ser visto na Tabela 4.

<i>Sistema-teste</i>	<i>SDEE 13 barras</i>		<i>SDEE 37 barras</i>		<i>SDEE 69 barras</i>	
	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>	<i>Newton-Raphson</i>	<i>Soma de correntes</i>
Número de iterações	11	9	9	7	6	4
Tempo de cômputo (s)	0,0924	0,0155	0,3986	0,0202	1,1943	0,0319

Tabela 4. Desempenho computacional dos métodos usados

Vale salientar que o elevado número de iterações do método de Newton-Raphson é justificado pela tolerância estabelecida.

4.2 Inserção de GDs

Geradores distribuídos foram alocados nas barras com tensões menores para o cenário de carregamento pesado com o intuito de melhorar o perfil de tensão. Desta forma, para o SDEE de 13 e de 37 barras foram alocados geradores nas barras 12 e 34, respectivamente. Os perfis de tensão são apresentados na Fig. 4 e Fig. 5.

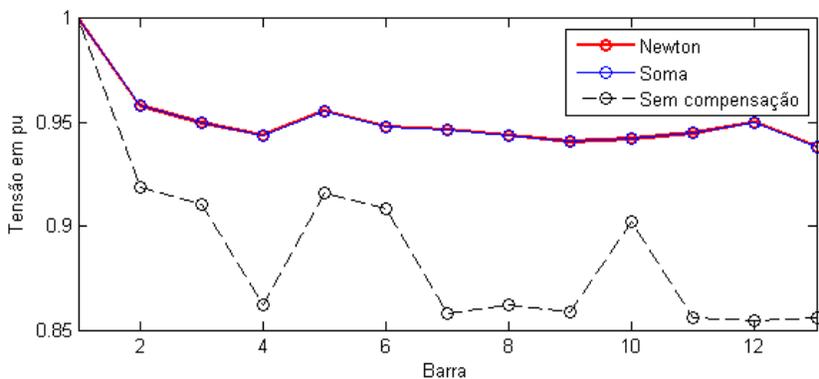


Fig. 4: Perfil de tensão para o SDEE 13 barras.

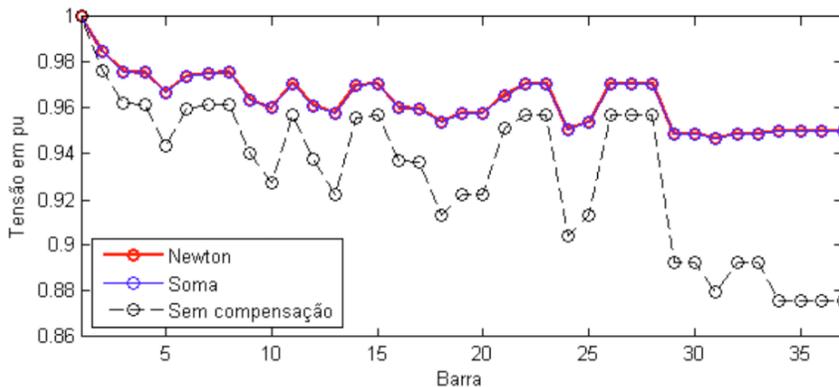


Fig. 5: Perfil de tensão para o SDEE 37 barras.

Por outro lado, no caso particular do sistema de 69 barras, ambos os métodos apresentaram problemas de convergência ao alocar um gerador distribuído na barra 56.

4.3 Variações da relação X/R nas LT

Tomando como referência o cenário de carga pesada foram escolhidas arbitrariamente algumas LT para alterar a relação X/R . O critério adotado para realizar as alterações consiste em identificar os trechos dos sistemas-teste com tensões inferiores a 0,90 p.u. e posteriormente, determinar os pontos de operação para várias relações X/R , conforme mostrado na Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8.

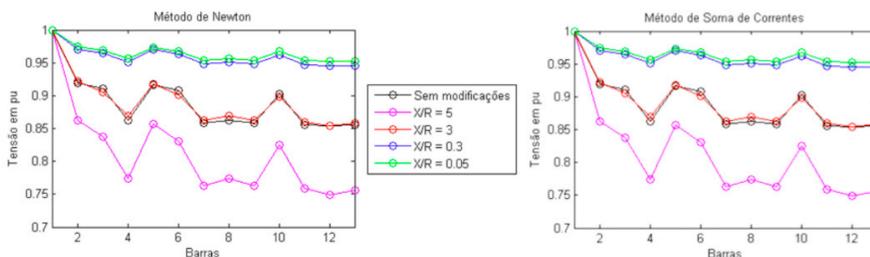


Fig. 6: Perfis de tensão para diferentes valores de X/R no SDEE 13 barras

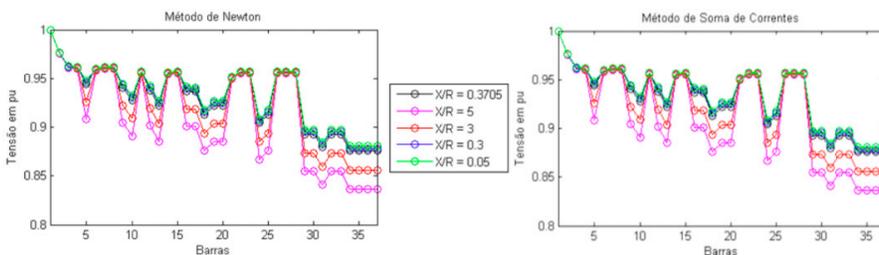


Fig. 7: Perfis de tensão para diferentes valores de X/R no SDEE 37 barras.

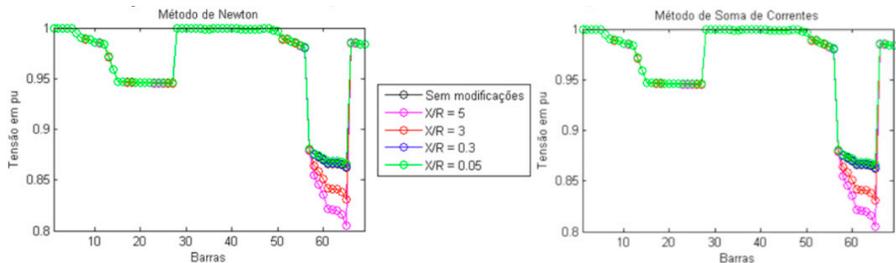


Fig. 8: Perfis de tensão para diferentes valores de X/R no SDEE 69 barras.

Apesar de que as alterações na relação X/R incidem na queda de tensão em alguns trechos, o método de Newton-Raphson não apresentou problemas de convergência. Adicionalmente, pode-se perceber que ambos os métodos convergiram no mesmo ponto de operação.

5 I CONCLUSÃO

Devido às diferenças encontradas entre os SDEE e os STEE, métodos próprios para solução do problema do fluxo de potência foram propostos. Este trabalho teve a finalidade de investigar se as características intrínsecas dos SDEE tornavam inaplicável o método de Newton-Raphson nos SDEE. Verificou-se, através da revisão bibliográfica, que os métodos de referência para os estudos de fluxo de potência em STEE e SDEE são respectivamente, o método de Newton-Raphson e o de Soma de Correntes. Dessa maneira, os algoritmos de solução do fluxo de potência propostos pelos métodos foram implementados em MATLAB® e aplicados na determinação do ponto de operação de três sistemas-teste.

Os resultados obtidos através dos métodos Newton-Raphson e de Soma de Correntes mostram que ambos os métodos convergiram no mesmo ponto de operação, o que indica que o método de Newton-Raphson pode ser usado para realizar estudos de fluxo de carga em SDEE. De modo geral, pode-se perceber que as diferenças dos resultados numéricos entre ambos os métodos começam a surgir a partir da quinta casa decimal. Vale a pena salientar que, ambos os métodos apresentaram problemas de convergência para as mesmas situações. Essa condição pode estar diretamente relacionada às características dos sistemas-teste analisados e não devido à formulação do método de Newton-Raphson.

Como trabalho futuro, aconselha-se estender as análises realizadas para sistemas-teste de maior porte e, até mesmo, desbalanceados, bem como estudar a alocação ótima de GD em SDEE e incluindo os limites de geração.

REFERÊNCIAS

ANEEL, PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf. Acesso em: 08 abr. 2021.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 1, p. 725-734, 1989.

BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. **IEEE Transactions on Power System**, v. 10, n. 1, p. 483-491, 1995.

BARAN, M. E.; STATON, E. A. Distribution transformer models for branch current based feeder analysis. **IEEE Transactions on Power System**, v. 12, n. 2, p. 698-703, 1997.

CARVALHO, M. R. Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CESPEDES, R. G. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 391-396, 1990.

CHIANG, H. D. A decoupled load flow method for distribution power networks: algorithms, analysis and convergence study. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 13, n. 3, p. 130-138, 1991.

CIRIC, R. M.; FELTRIN, A. P.; OCHOA, L. F. Power flow in four-wire distribution networks – A general approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 4, p. 1283-1290, 2003.

FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation. **Electric Power Systems Research**, v. 97, p. 51-60, 2013.

GOMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. Electric Energy Systems Analysis and Operation. Boca Raton, FL: Ed. CRC Press, 2009.

GOSWANI, S.; BASU, S. A new for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 3, p. 1484-1491, 1992.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. J. Power System Analysis. New York, NY: Ed. Mc Graw Hill, 1994.

KERSTING, W.H. Radial Distribution Test Feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 6, No. 3, pp. 975-985, 2001.

LODDI, T. Cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de Newton desacoplado rápido com rotação de eixos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2010.

MONTICELLI, A. Fluxo de carga em rede de energia elétrica. São Paulo, SP: Ed. Edgard Blücher, 1983.

MONTICELLI, A. State estimation in Electric Power System: A generalized approach. Boston, MA: Ed. Kluwer Academic Publishers, 1999.

MURUGANANTHAM, B.; GNANADASS, R.; PADHY, N. P. Performance analysis and comparison of load flow methods in a practical distribution system. **IEEE 19th National Power Systems Conference (NPSC)**, 2016.

SAADAT, H. Power System Analysis. New York, NY: Ed. Mc Graw Hill, 1999.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

SHIRMOHAMMADI, D.; CHENG, C. S. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 671-679, 1995.

WASLEY, R. G.; Shlash, M. A. Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, n. 7, p. 630-638, 1974.

ZHANG, F; CHENG, C.S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 1, p. 389-397, 1997.

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]:

$$N=(P,T,A,\omega) \quad (1)$$

where:

"P" is the finite set of places, $P \neq \emptyset$. "T" is the finite set of transitions, $T \neq \emptyset$. " $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ " 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.

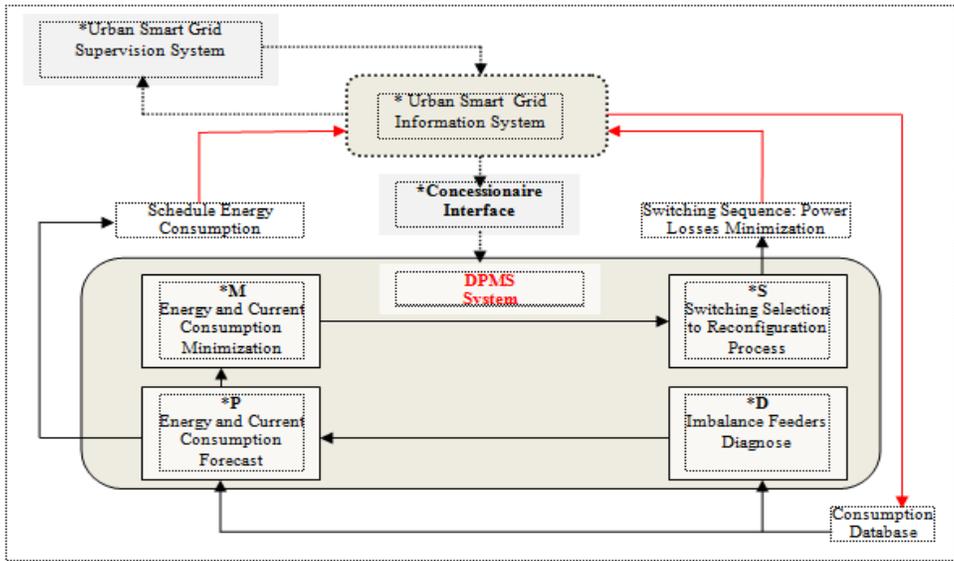


Figure 1. DPMS architecture.

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.

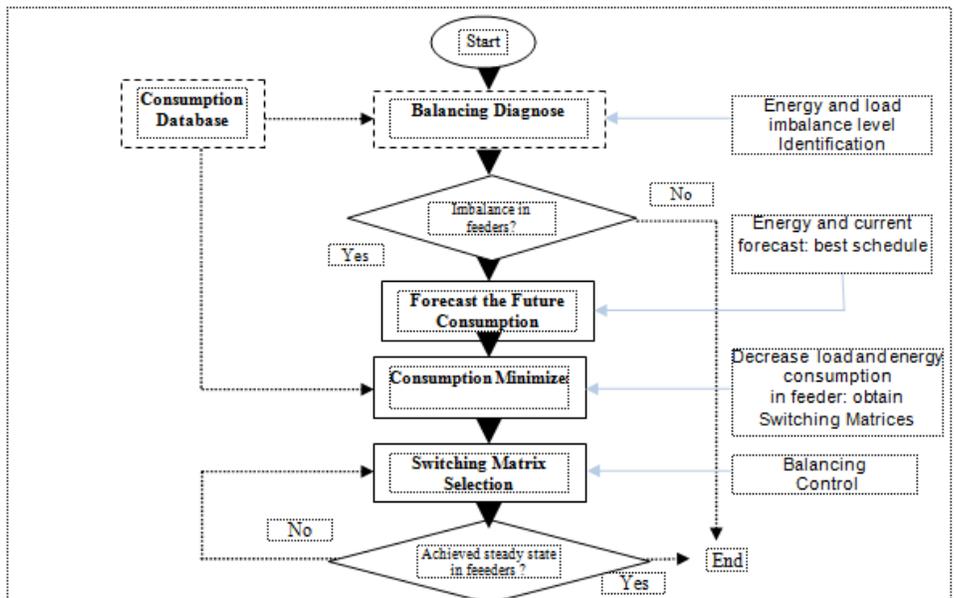


Figure 2. DPMS flowchart.

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.

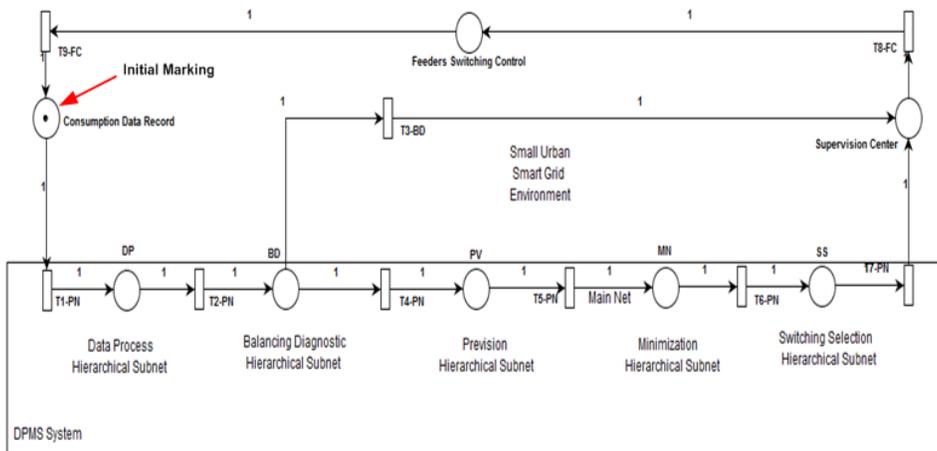


Figure 3. DPMS in THPN: Main Petri net.

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.

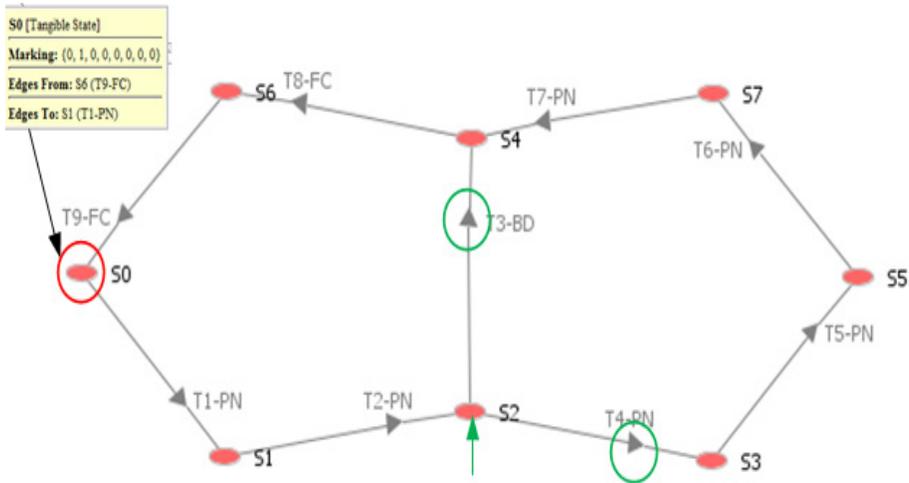


Figure 4. Main DPMS: Reachability Graph.

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):

$$M(DP) + M(BD) + M(PV) + M(MN) + M(SS) = 1 \quad (4)$$

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):

$$M(BD) + M(SC) + M(FC) + M(CDR) = 1 \quad (5)$$

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.

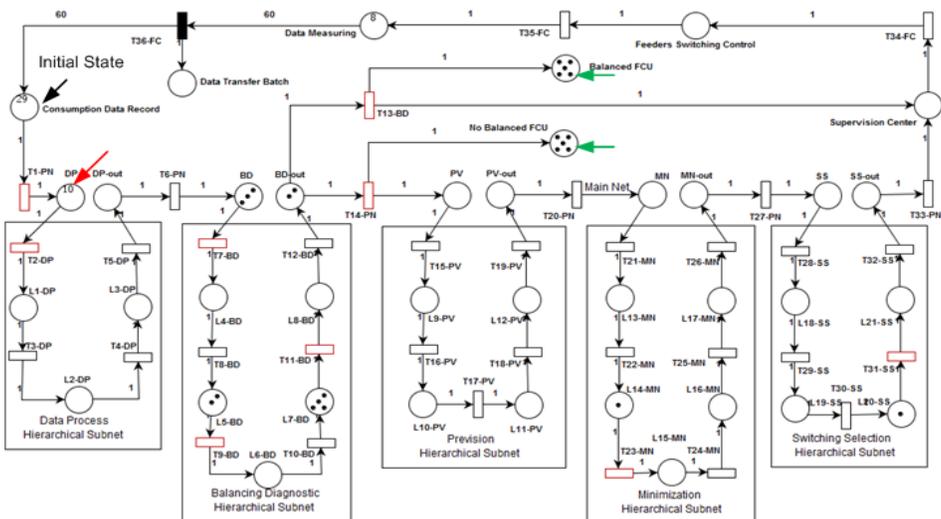


Figure 5. DPMS in THPN Simulation.

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.

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

Data de aceite: 01/06/2021

Ednei Luiz Miotto

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

Bruno Rafael Gamino

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

Elenilson de Vargas Fortes

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

Percival Bueno de Araujo

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

Luís Fabiano Barone Martins

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

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

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

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

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

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

1 | INTRODUÇÃO

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

uma série de equipamentos com características dinâmicas distintas.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2 | MODELO DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA DO GUPFC

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

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

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

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

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

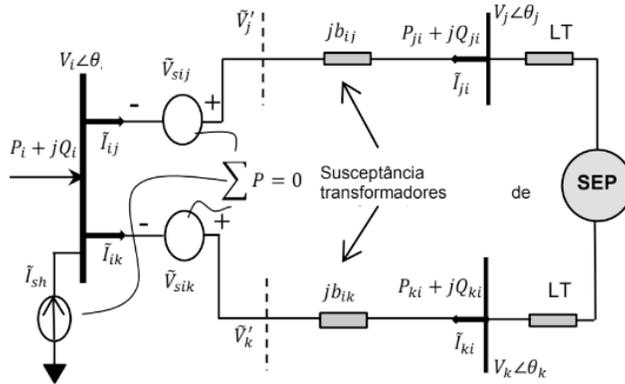


Figura 1. Circuito equivalente do GUPFC.

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

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

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

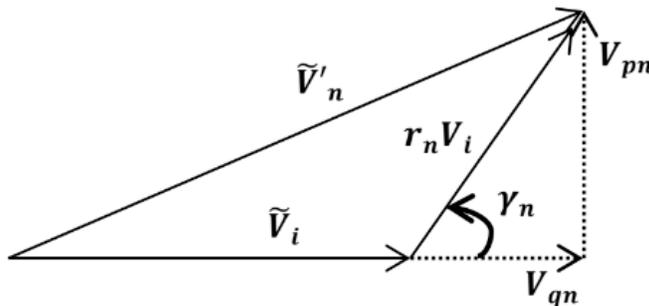


Figura 2. Diagrama fasorial do GUPFC.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

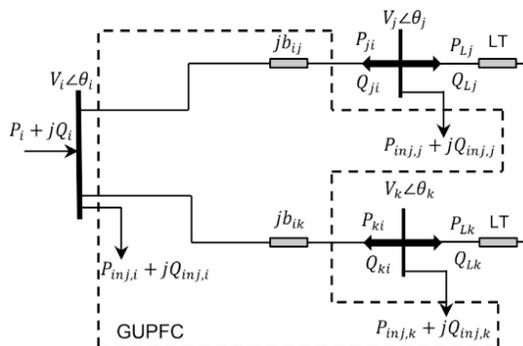


Figura 3. Controle dos fluxos de potência pelo GUPFC.

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

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

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

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

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

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

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

2.1 Estrutura do Sistema de Controle do GUPFC

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

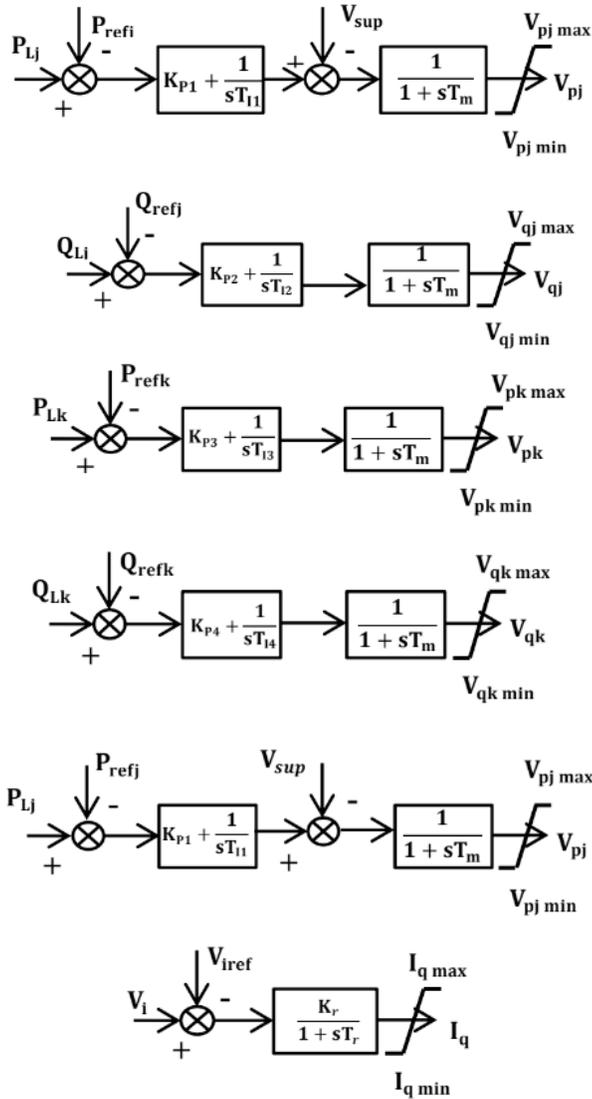


Figura 4. Estrutura do sistema de controle do GUPFC.

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

3 I CONTROLADORES ESP E POD

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

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

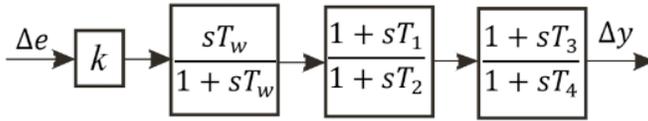


Figura 5. Estrutura para os controladores ESP e POD.

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

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

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

4 | PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

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

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

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

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

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

Os coeficientes de aceleração ρ_1 e ρ_2 , juntamente com os valores randômicos r_1 e r_2 , ponderam a influência estocástica dos fatores cognitivo e social da velocidade da partícula, respectivamente. Segundo Bratton e Kennedy (2007) quando $\rho_1 + \rho_2 < 4,0$, pode levar o enxame de partículas a uma convergência lenta ou até mesmo não convergir. Porém, se $\rho_1 + \rho_2 > 4,0$, a convergência do método pode ser rápida e garantida. Este trabalho considerou $\rho_1 + \rho_2 = 4,0$, sendo $\rho_1 = \rho_2 = 2,0$. Também foi considerado uma população de 20 partículas e limitado a um número máximo de 500 testes da função objetivo.

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

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

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

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

5 | SIMULAÇÕES E RESULTADOS

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

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

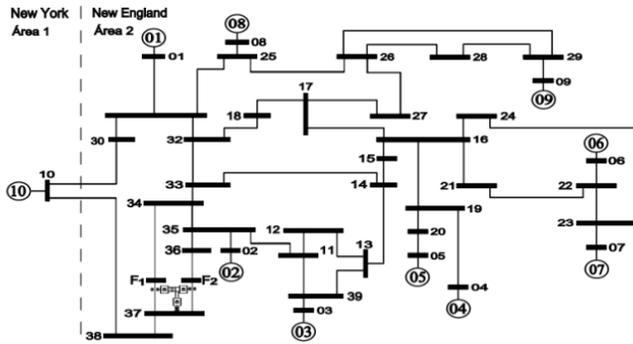


Figura 6. Diagrama unifilar: sistema *New England*.

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabela 1. Autovalores Dominantes, ξ e ω_n – Caso Base e Caso 2.

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

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

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

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

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

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

Tabela 4. Autovalores Dominantes, ξ e ω_n – Controladores Adicionais em Operação.

6 | CONCLUSÕES

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

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO 5

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

Data de aceite: 01/06/2021

André Ross Borniatti

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/1414695090460054>

Pedro Daniel Bach Montani

Mont Soluções em Engenharia Ltda
Porto Alegre - RS
<http://lattes.cnpq.br/8805246875137967>

Luís Eduardo Rocha Nepomuceno

Força Aérea Brasileira - FAB
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/5399537488211124>

Daniel Pinheiro Bernardon

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/6004612278397270>

Luciane Neves Canha

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/6991878627141193>

Lucas Thadeu Orihuela da Luz

Mont Soluções em Engenharia Ltda
Porto Alegre - RS
<http://lattes.cnpq.br/9933402019800626>

Giuliano Bolognesi Archilli

CPFL Energia S.A.
Campinas - SP
<http://lattes.cnpq.br/6450211060332960>

Isabel Fighera Hartmann

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/4411125777651276>

Marcia Henke

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/6300679718400915>

Táisson Soares Graebner

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/7796686248439407>

Tiago Bandeira Marchesan

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/2318413245910780>

RESUMO: O artigo propõe a implementação de um sistema de gestão de energia em uma Instituição Pública de Ensino baseada na NBR ISO 50.001/2018 (ABNT, 2018), visando a redução de despesas com energia elétrica. Serão descritas as etapas utilizadas na abordagem, com a finalidade de colocar em prática métodos e técnicas proativas para a supervisão, controle e aquisição de dados em instituições públicas. O projeto de pesquisa e desenvolvimento foi desenvolvido no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e apresenta uma estratégia de gestão focada no uso inteligente das informações, respeitando as características das instituições públicas de ensino. Também serão descritas neste trabalho as demais ações implementadas institucionalmente pela Universidade para a redução de perdas e desperdício de energia elétrica, tais como instalação de bancos de capacitores, revisão no processo administrativo de pagamento das

faturas, orientações aos agentes envolvidos sobre a utilização racional da energia elétrica e ajuste na demanda contratada junto a RGE, concessionária local de distribuição de energia elétrica, além dos resultados obtidos. Os resultados já obtidos demonstram uma redução média de 10% na fatura mensal de energia elétrica da UFSM.

PALAVRAS-CHAVE: Consumo de Energia Elétrica; Gestão de energia elétrica; Recursos Públicos; Eficiência energética.

INNOVATIVE SOLUTIONS IN ENERGY EFFICIENCY AND PV MICROGENERATION AT FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA - UFSM

ABSTRACT: The article proposes the implementation of an energy management system in a Public Educational Institution based on NBR ISO 50.001 / 2018 (ABNT, 2018) with a view to reduce electricity expenses. The necessary steps for its implementation will be described in order to implement proactive methods and practices for the supervision, control and acquisition of data in public institutions. This work was developed at the Technology Center (CT) of the Federal University of Santa Maria (UFSM) and presents a management strategy focused on the intelligent use of information, respecting the characteristics of public educational institutions. The other actions institutionally implemented by the University to reduce losses and waste of electrical energy and their results, such as the installation of capacitor banks, review of the administrative process for bill payment, guidance to the agents involved on the rational use of electricity and adjustment in demand contracts. Partial results already demonstrate an average reduction of 10% in UFSM's monthly electricity bill.

KEYWORDS: Energy consumption; Demand limits, Electric Energy Management; Public Resources; Energy efficiency.

1 | INTRODUÇÃO

Entre as Instituições Públicas de Educação Superior, encontram-se, atualmente, 69 (sessenta e nove) Universidades Federais (MEC, 2020). Essas instituições desempenham um importante papel no desenvolvimento científico e tecnológico do país, respondendo por uma parcela significativa da produção científica brasileira e pela formação de profissionais nas mais diversas áreas do conhecimento. Constatou-se que, em grande parte destas instituições públicas, a conta de energia elétrica é um dos maiores custos do orçamento anual. De acordo com a Secretaria de Ensino Superior (SESu) do Ministério da Educação, o valor total pago em 2015 apenas pelas Universidades Federais foi de cerca de R\$ 430.000.000,00. Esta situação motivou uma chamada pública da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com utilização de recursos dos programas de P&D e Eficiência Energética (ANEEL, 2016).

Este trabalho se originou de um projeto de Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética, denominado Projeto P&D 0396-0038/2016, executado pela RGE, UFSM e empresa Mont Soluções, com o objetivo de propor ações proativas para reduzir as despesas com a energia elétrica e promover a conscientização quanto à utilização eficiente deste insumo. A implementação do piloto proporcionou o

desenvolvimento e instalação do Sistema de Gestão de Energia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), interior do estado do Rio Grande do Sul.

O sistema de gestão de energia elaborado apresenta potencial de redução de despesas com energia elétrica, contemplando metodologia, ações eficientes de gestão, controle da contratação, monitoramento da utilização da energia e redução valor pago na fatura de energia elétrica para a distribuidora local. O sistema contempla a elaboração de um programa de eficientização com metas e justificativas das ações, apoiados pela administração da UFSM. O objetivo é empreender ações visando conscientizar e envolver todo o efetivo de servidores (professores e técnico-administrativos), alunos e demais partes interessadas no programa, estabelecer índices máximos de consumo, avaliar as oportunidades com a implementação de projeto de minigeração e eficiência energética baseado em fontes renováveis, dentre outras funções.

Para que fosse possível a redução das despesas com energia elétrica na UFSM foi criada uma Equipe para implementar e gerir o que se denominou de Sistema de Gestão de Energia (SGE) adotando a Norma NBR ISO 50.001/2018 (ABNT, 2018). A norma define a necessidade de criação de uma política energética, indicadores de desempenho energético, definição de objetivos e metas da organização, que devem ser atualizadas periodicamente. A forma de aquisição e utilização da energia devem ser analisadas no início do trabalho e revisadas periodicamente.

Este artigo apresenta a sistemática implementada no projeto, detalhando as ações de eficiência energética, equipamentos para aquisição de dados utilizados, software para acompanhamento do sistema, ações de eficiência energética e instalação de um sistema solar fotovoltaico. O artigo também explora as ações efetivadas pela UFSM de forma institucional, o que também contribui muito para o alcance dos resultados.

2 | SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA

Considerando-se a quantidade de unidades e extensão física do campus, definiu-se que o SGE deveria ser implantado no prédio do Centro de Tecnologia (CT) onde já há um nível de maturidade em relação ao tema, criando, desta forma, condições favoráveis ao a um case modelo que favoreça o ajuste dos processos e controle de documentos. Desta forma, os resultados podem ser alcançados mais rapidamente. Após a consolidação no CT, planeja-se que o SGE possa ser estendido para as demais unidades da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

A NBR ISO 50.001/2018 (ABNT, 2018) preconiza desde a aquisição, utilização, práticas de consumo consciente, eficiência energética, entre outros pontos referente a energia elétrica.

O sistema foi estruturado de forma a atender todos os requisitos da Norma e adequá-los a uma Instituição Pública de Ensino Superior. Pela amplitude da instituição, atenção

especial deve ser dada à comunicação e responsabilidade entre as diversas unidades.

Com a finalidade de monitorar os resultados e os indicadores de desempenho energético do CT foi instalado um medidor inteligente de energia elétrica em sua subestação. Este permitirá a análise individual de consumo do prédio, além do medidor de entrada de energia junto à concessionária que fornece os dados de toda a Universidade. O medidor é dotado de comunicação e envia os registros a um banco de dados da universidade através de rede sem fio (*LoRaWAN*). Os dados são adquiridos automaticamente pelo software, juntamente com os demais parâmetros para que o cálculo dos indicadores seja realizado com a menor intervenção humana possível.

Para acompanhar e apoiar a implementação, monitorar resultados e centralizar a documentação, foi desenvolvido um software para suportar todas as funções do SGE, de forma que a gestão do sistema seja efetuada com eficácia, garantindo o pleno controle de todos os documentos do sistema. Considerando que o software foi desenvolvido concomitantemente à implementação do sistema, é importante que a plataforma tenha funções que possam facilmente ser parametrizadas para contemplar necessidades futuras visando garantir plena aderência a todas as necessidades do projeto. Para garantir que o software suporte satisfatoriamente os requisitos do projeto a especificação foi elaborada considerando esta particularidade. A Figura 1 demonstra uma tela do sistema.



Figura 1 - Tela do software de Gestão de Energia

Nesta etapa o projeto alcançará todas as unidades do CT e a participação e conscientização da quantidade máxima de servidores e partes interessadas possíveis. As redes sociais, *Facebook* e *Instagram*, estão sendo empregadas com o objetivo de divulgação das ações e resultados para a comunidade geral. Também estão previstos treinamentos no

sistema e conscientização na utilização racional e inteligente da energia elétrica.

Como parte integrante deste sistema tem-se a análise das instalações e a implementação de ações de eficiência energética. Um primeiro diagnóstico energético foi realizado, conforme as seguintes etapas:

- Mensuração do consumo de energia elétrica nos principais usos finais e indicações de ações de eficiência energética envolvendo a substituição de tecnologias mais eficientes nas suas instalações;
- Estudo para instalação de sistema de geração de energia elétrica a partir de painéis solares de acordo com as regras da Geração Distribuída (ANEEL, 2012 e 2015);
- Estruturação de um processo de Etiquetagem das Instalações das Edificações da Unidade;
- Análise da inserção das disciplinas de eficiência energética e geração distribuída na grade curricular dos cursos de Engenharia Elétrica, Civil e Arquitetura, além de suas pós-graduações;
- Estudos referentes ao impacto da geração distribuída na rede da distribuidora:
 - Perfil de tensão no(s) alimentador(es);
 - Carregamento do(s) transformador(es) (medir e simular);
 - Injeção de harmônicos;
 - Perdas (aumento ou redução);
 - Ilhamento;
 - Correção de fator de potência e serviços ancilares, incluindo modelos de remuneração para o consumidor;
 - Limite e sustentabilidade da inserção de geração distribuída na rede local;
 - Eficiência técnica e econômica da(s) tecnologia(s) escolhida(s).

Esta análise resultou na implementação das seguintes ações:

- Substituição de 1.300 lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W e reatores, por lâmpadas com tecnologia LED tubular de 18W nas salas de aula e/ou salas administrativas. Os reatores utilizados são do tipo eletrônicos e consomem 1W;
- Substituição de 56 pontos com lâmpadas e reatores de VSAP (Vapor de Sódio de Alta Pressão) de 250W por luminárias de LED de 150W na iluminação de vias públicas.
- Foi implementado também um sistema de telegestão para a otimização da utilização da iluminação das vias públicas internas da UFSM, visando a redução

da potência em horários de menor circulação, ou seja, durante a madrugada e, conseqüentemente redução de custos com energia elétrica, conforme demonstrado na Figura 2



Figura 2 - Substituição das Luminárias de iluminação pública

Para as ações na iluminação, foi considerada a necessidade de atendimento à NBR 5413 com realização de medições antes e depois das substituições afim de que o nível de iluminamento atendesse a referida norma.

- Instalação de um sistema de geração de energia elétrica utilizando painéis solares com capacidade instalada de aproximadamente 100 kWp. Figura 3 demonstra a planta instalada.



Figura 3 - Planta de minigeração solar fotovoltaica da UFSM

Devido à grande área física da UFSM e a limitação financeira definida para a

elaboração deste estudo, restaram inúmeras outras oportunidades de ações de eficiência energética em diversos setores.

Buscando a maximização de resultados existem outras iniciativas como sendo parte integrante das ações de implementação do sistema de gestão energética em andamento, tais como:

- Inclusão e monitoramento de resultados através de Sistema de arrefecimento geotérmico e rastreamento solar inteligente de módulos fotovoltaicos, conforme demonstrado na figura 4.



Figura 4 - Planta experimental reconfiguração geotérmica da UFSM

- Otimização Recursos Integrados de Geração na UFSM
- Impacto da Minigeração nas Redes Elétricas da UFSM
- Arranjos Técnico e Comercial da Minigeração
- Sistema de Telegestão da Iluminação Pública
- Iluminação de Salas de Aula
- Sistemas de Climatização
- Sistema de Comunicação dos Medidores com *LoRaWAN*
- Central de Medição

A figura 5 demonstra os pontos de medição instalados no Campus de Santa Maria.



LoRaWAN™



Figura 5 - Central de medição e medidores de comunicação sem fio

No total são 60 medidores inteligentes de energia instalados nas unidades acadêmicas da UFSM, com acesso remoto via smartphone, notebook, tablet, etc., possibilitando monitoramento do consumo de energia elétrica em tempo real. A figura 6 mostra a localização dos medidores instalados no campus de Santa Maria.

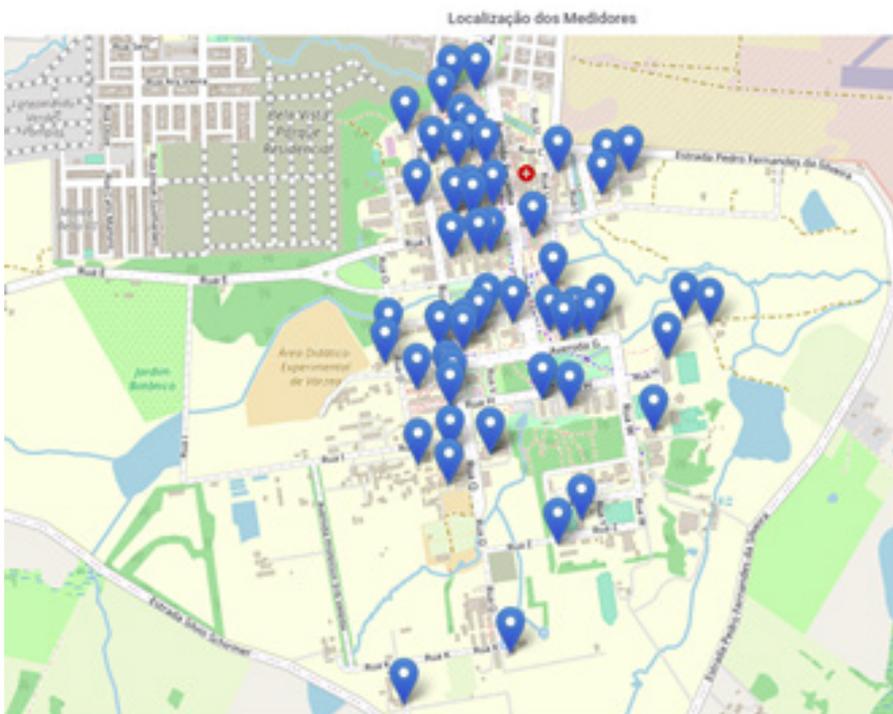


Figura 6 - Localização dos medidores no Campus Santa Maria

3 | DEMAIS AÇÕES IMPLEMENTADAS

Com o objetivo de controlar e reduzir os custos com energia elétrica na Universidade Federal de Santa Maria diversas ações foram realizadas. Entende-se que várias pequenas ações têm resultados significativos em seu somatório. As principais ações são relatadas abaixo.

a. Ações para evitar o pagamento de multas:

Ajuste no processo administrativo de pagamento das faturas de energia elétrica

O processo foi revisto e redefinido. A partir de outubro/2019 os pagamentos são executados ainda dentro do prazo de vencimento da fatura, logo sem a incidência de multas de mora.

Instalação de bancos de capacitores

Com o objetivo de ajustar o fator de potência das instalações da Universidade e estancar o pagamento de multas por excesso de reativos foram instalados dois bancos de capacitores totalizando 600 kVAr, um em cada troncal dos alimentadores da UFSM. O investimento foi de R\$ 40.000,00. A partir de agosto/2019 o fator de potência foi ajustado e não houve mais a incidência de multas por este motivo. A figura 7 mostra o equipamento instalado na avenida principal do Campus da UFSM em Santa Maria e a figura 8 demonstra a evolução dos pagamentos devido às multas por excesso de reativos.



Figura 7 - Banco de Capacitores instalado na UFSM

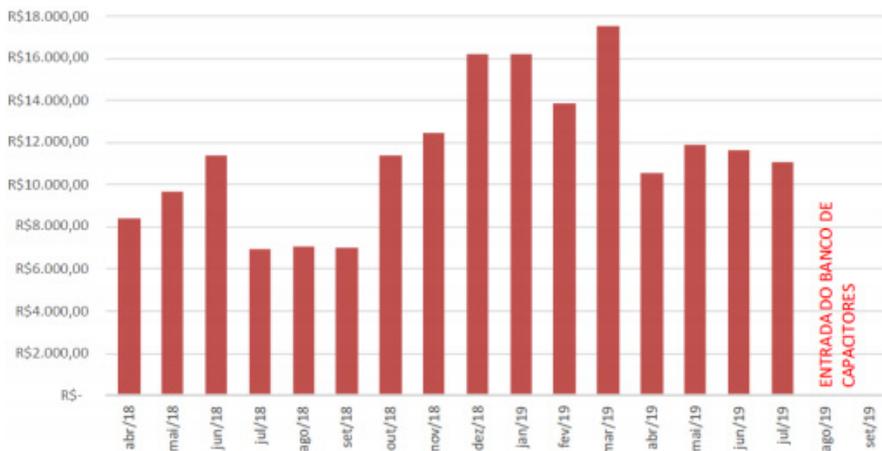


Figura 8 - Pagamento de multas por excesso de reativos

Ajuste na contratação de energia junto à RGE

Foi ajustado o contrato de fornecimento junto a RGE, concessionária local, conforme legislação vigente (BRASIL, 1993; CPFL ENERGIA, 2018; ANEEL, 2010; ANEEL, 2017). A partir de setembro//2019 não existem mais valores na conta por ultrapassagem da demanda contratada.

b. Ações visando evitar o desperdício de energia elétrica:

Orientações quanto a utilização das salas de aulas e salas administrativas

Algumas orientações ao corpo de professores e técnico-administrativos da UFSM foram realizadas com o objetivo de evitar o desperdício de energia elétrica, tais como:

- Uso moderado de ar-condicionado e elevadores;
- Desligar tudo nas salas antes de sair;
- Desligar frigobares em salas e usar refrigeradores coletivos;
- Desligar Quentinhas após as 18h;
- Evitar banhos na Casa do Estudante entre 18 e 21h.

Estas orientações foram disseminadas a partir de áudios enviados pela Reitoria a cada Centro de Ensino e também por mensagens no site e e-mail's para todos os servidores. A adesão foi ampla e contribui muito para que os resultados fossem alcançados.

Além disto, ações de divulgação em eventos no início de cada semestre, para as informações atingirem principalmente os novos alunos e também em eventos de acolhimento de novos servidores da UFSM, de forma a ampliar a disseminação destas informações.

Instalação de 12 lâmpadas LEDs para iluminação do estacionamento principal do CT

Em continuidade a instalação de luminárias com tecnologia LED, a UFSM instalou mais 12 pontos de iluminação pública em substituição às lâmpadas vapor de sódio. Estas luminárias possuem tecnologia mais moderna e rendimento mais alto o que possibilita a redução da potência mantendo a intensidade luminosa anterior. Estas luminárias são equipadas com dispositivos de comunicação que permitem telegerenciamento, logo podem reduzir o fluxo luminoso durante a madrugada, o que contribui para baixar os custos com a energia elétrica.

4 | RESULTADOS

O resultado principal deste projeto é a implementação do Sistema de Gestão de Energia no CT, onde será possível padronizar, monitorar e controlar as despesas com energia elétrica da UFSM. Planeja-se a expansão futura deste Sistema aos demais Centros da Universidade.

Em um dos pilares do sistema, estão as ações de eficiência energética. Os resultados das ações foram:

- Energia Gerada pelo SSFV de 142,44 MWh/ano;
- Energia economizada na iluminação de 82,8 MWh/ano;
- Demanda retirada da ponta de 25,03 kW;
- Investimento de aproximadamente R\$ 1 MM
- Redução anual na fatura de R\$ 127.127,69

Outros resultados referentes as demais ações implementadas na UFSM:

- Retirada de todos os valores de multas pagas pela Universidade na fatura de energia elétrica, seja por atraso no pagamento, excesso de reativos ou ultrapassagem na demanda contratada.
- Redução do desperdício através da orientação aos professores, alunos, servidores técnico-administrativos e demais agentes envolvidos quanto a correta utilização da energia elétrica.

Somando estes resultados, tem-se a redução média de aproximadamente 10% na fatura mensal de energia elétrica da UFSM (cerca de R\$ 120.000,00), conforme demonstrado na figura 9.

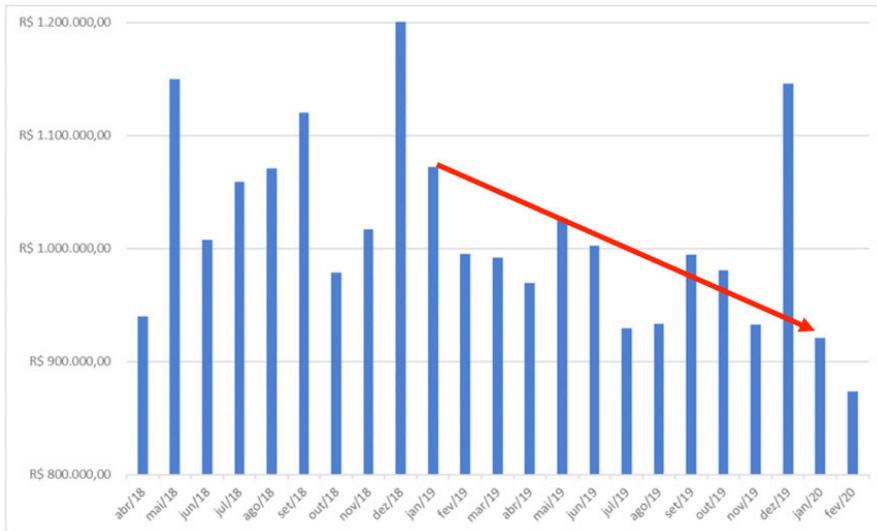


Figura 9 - Evolução da Fatura de Energia Elétrica da UFSM

Salienta-se que a UFSM tem uma entrada única de energia elétrica e por enquanto a verificação dos resultados financeiros leva em conta todas as unidades do Campus da Universidade na cidade de Santa Maria.

A análise foi realizada até o mês de fevereiro de 2020, pois a partir do dia 17 de março de 2020 foi decretada a suspensão das atividades acadêmicas e administrativas na USFM, devido à pandemia de Covid-19, impactando neste quesito. Nota-se uma redução de consumo no ano de 2019, onde as ações já estão mais consolidadas, visto que as medidas começaram a ser tomadas no último trimestre de 2018.

5 | CONCLUSÃO

O uso racional da energia é uma necessidade para a preservação dos recursos da natureza e redução de custos, portanto, depende de uma mudança de cultura associada a várias ações como ajuste da demanda contratada, conscientização dos servidores, alunos e demais pessoas envolvidas para que os mesmos estejam engajados e comprometidos e, as metas de economia/eficiência sejam alcançadas. Para isso todos no meio acadêmico devem ser constantemente incentivados a contribuir com os esforços para a economia de energia e seus benefícios para a organização e para a sociedade como um todo. A UFSM possui cerca de 30.000 alunos que se renovam permanentemente e terão grande potencial para disseminar os conceitos de uso racional da energia em suas áreas de atuação na sociedade.

Considerando que a UFSM é uma universidade pública, quando se refere à redução de custos, pode-se considerar esta redução expandida para toda a sociedade, uma vez

que os impostos pagos por todos os cidadãos são utilizados para este fim, inclusive. Como resultado secundário e não menos importante, a UFSM terá mais recursos para destinar à educação, sua atividade fim.

Entre as ações consolidadas pela UFSM podem-se citar: instalação de medidores inteligentes de energia elétrica; software de Sistema de Gestão de Energia; usina de minigeração fotovoltaica; substituição de 1.300 lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W por lâmpadas com tecnologia LED tubular de 18W nas salas de aula e salas administrativas da UFSM; substituição de 56 lâmpadas de VSAP (Vapor de Sódio de Alta Pressão) de 250W por luminárias de LED de 150W na iluminação de suas vias públicas, inclusão e monitoramento de resultados através de um sistema de arrefecimento geotérmico e reconfigurações fotovoltaicas solar; instalação de banco de capacitores (R\$ 40.000,00) para ajuste do fator de potência das instalações para evitar pagamento de multa na fatura de energia elétrica por excesso de reativos; ajuste no processo administrativo de pagamento das faturas de energia elétrica para serem executados no prazo e evitar incidência de multas de mora, entre outros, resultaram em uma redução na fatura mensal de energia elétrica. Entende-se que várias pequenas ações têm resultados significativos em seu somatório.

Somando estes resultados e analisando o período de abril de 2018 a fevereiro de 2020, atingiu-se uma redução de aproximadamente R\$ 200.000,00 (duzentos mil reais) na fatura de energia elétrica da UFSM.

AGRADECIMENTOS

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

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro do Grupo CPFL Energia pelo projeto P&D 0396-0038/2016, aos programas de P&D e PEE regulados pela ANEEL e à Universidade Federal de Santa Maria – UFSM por apoiar o desenvolvimento da pesquisa através do Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Chamada Nº. 001/2016** - Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: “Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”, Brasília, outubro 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/15136291/FAQ+1/d67acfd0-9919-4666-a448-1385cc83fa11>. Acesso em: 08 ago. 2020.

_____. **Resolução Normativa nº 414, 09 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2018.

_____. **Resolução 482/2012. 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2020.

_____. **Resolução 687/2015. 24 de novembro de 2015.** Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2020.

_____. **Bandeiras Tarifárias.** Brasília, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/1VUdU57>. Acesso em 17 abr. 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 50.001: Sistemas de Gestão da Energia - Requisitos com orientação para uso,** 31 de agosto de 2018.

BRASIL, **Lei n. 8.631,** de 04 de março de 1993. Dispõe sobre a fixação dos níveis das tarifas para o serviço público de energia elétrica, extingue o regime de remuneração garantida e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder executivo, Brasília, DF, 05 de mar. 1993. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1993/lei-8631-4-marco-1993-363230-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 17 abr. 2018.

CPFL ENERGIA. **Tarifas RGE.** 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2MNeZLg>. Acesso em: 15 jun. 2018.

MEC, Ministério da Educação. **Educação Superior.** 2020.

PROJETO P&D 0396-0038/2016. RGE, UFSM e Mont Soluções. **Soluções Inovadoras de Eficiência Energética e Minigeração em Instituição Pública Federal de Ensino Superior:** Uma Abordagem na UFSM. 2017.

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.

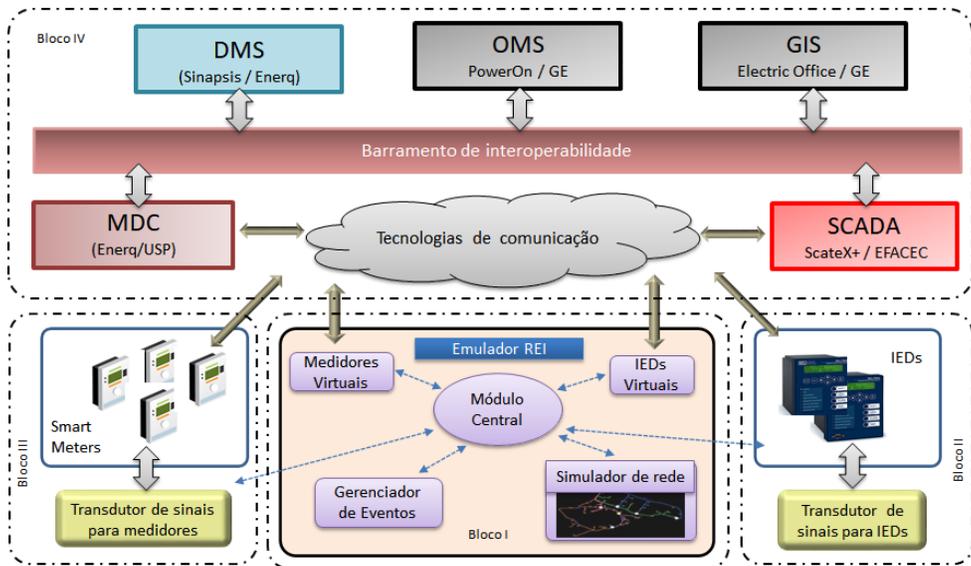


Figura 1 - Ambiente laboratorial de REIs, destaque para o Emulador REI ao centro.

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.

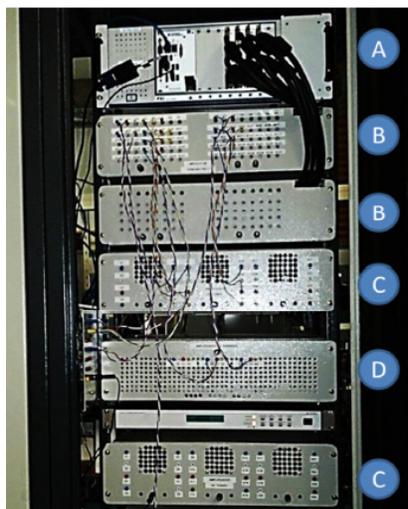


Figura 2. Transdutor de sinais, contemplando: A) hardware PXI, B) painéis de conexão, C) amplificadores de tensão, D) amplificadores de corrente.

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.

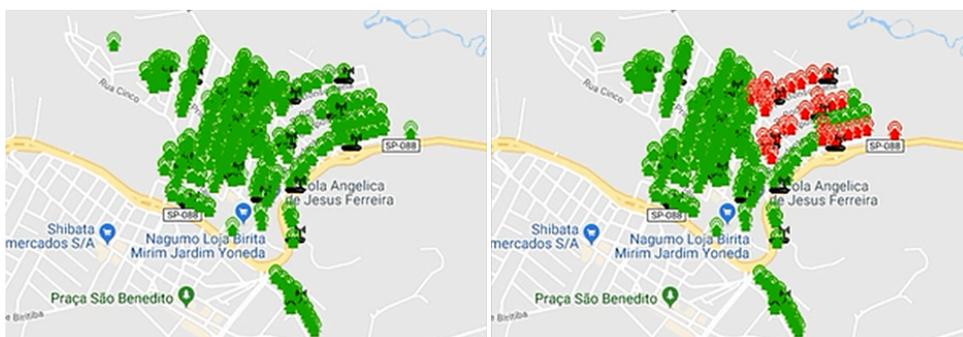


Figura 5. Telas do MDC/MDM apresentando os alarmes dos medidores inteligentes, de forma georeferenciada, antes (esquerda) e depois (direita) do rompimento de cabo.

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.

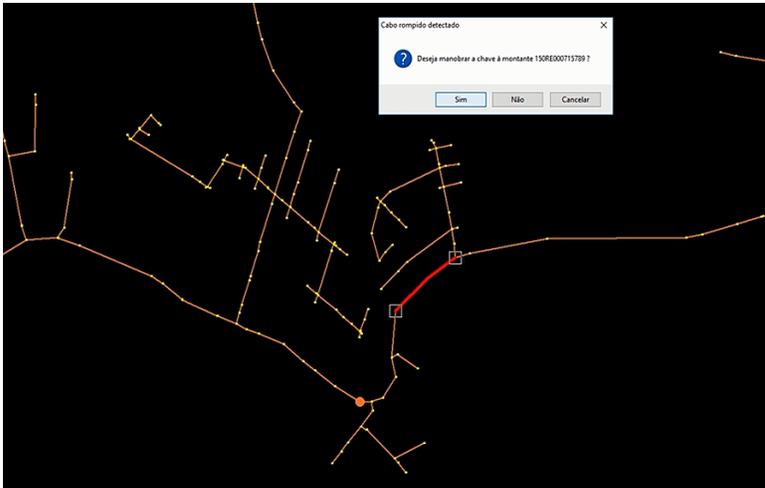


Figura 6. Tela do DMS identificando o trecho com cabo rompido após o seu algoritmo localizar o defeito na rede elétrica.

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.

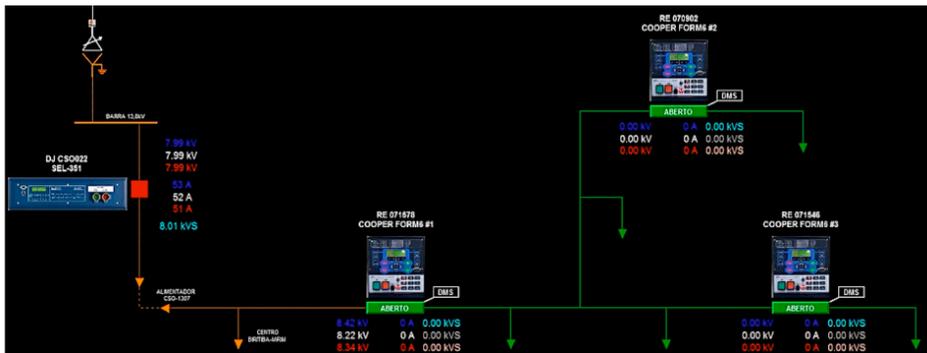


Figura 7. Tela do SCADA após da realização das manobras que isolam o trecho com defeito.

3 I 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.

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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

Carollina Silva de Santana

Instituto Federal da Bahia
Salvador – BA

<http://lattes.cnpq.br/6373796158461965>

Armando Hirohumi Tanimoto

Instituto Federal da Bahia
Salvador – BA

<http://lattes.cnpq.br/4327068923950927>

RESUMO: Cientes da relevância do desenvolvimento sustentável, é papel da rede educacional de ensino transmitir conhecimento científico, inovação e valores para as futuras gerações, incorporando questões com a temática ambiental. O Instituto Federal da Bahia, *campus* Salvador, vem atuando com ações de sustentabilidade ambiental, abordando a gestão da energia elétrica de forma institucional, através de indicadores de consumo e procedimentos de melhoria compondo uma estatística de dados compondo referências para tomadas de decisões. Este trabalho foi baseado na coleta de dados referentes ao consumo de energia elétrica no *campus* em análise e em pesquisas sobre métodos de gestão implantadas em outras instituições de ensino. A partir destas informações, foi possível traçar de forma objetiva o perfil consumidor da instituição e identificar pontos de melhoria. No intuito de facilitar o entendimento, o projeto foi adaptado sob a luz da gestão

DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) aumentando sua eficiência e oferecendo maior clareza às etapas realizadas. Dessa forma, pretendeu-se reduzir o gasto de energia elétrica através de novos procedimentos para o uso eficiente considerando o perfil de consumo do *campus*. Em um período de seis meses, foi possível obter uma redução mensal média de 25% do consumo total de energia elétrica, o que representou 220 mil reais de economia no segundo semestre de 2019. O sistema de gestão vem sendo implantado há pouco tempo, ainda assim, mostra-se bem estruturado, com etapas claras e resultados satisfatórios, contribuindo para obtenção de melhorias sistemáticas e eficiência na utilização dos recursos econômicos.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão da energia, Eficiência energética, Sustentabilidade.

ELECTRICITY MANAGEMENT ON THE SALVADOR CAMPUS: IMPLEMENTING ACTIONS TO REDUCE CONSUMPTION WITH THE ENERGY DEALERSHIP

ABSTRACT: Aware of the generation of sustainable development, it is the role of the educational network to transmit knowledge, innovation and values to future generations, incorporating issues with the environmental theme. The Federal Institute of Bahia, Campus Salvador, has been acting in environmental sustainability actions, addressing the management of electric energy through consumption indicators and improvement procedures, composing a data statistic in a determined period of time. This work was based on the collection of data referring

to the consumption of electric energy on the Campus under analysis and on research on management methodologies implemented in other educational institutions. From this information, it was possible to trace the consumer profile of the institution objectively and identify points for improvement. In order to facilitate understanding, the project was adapted in the light of the DMAIC management methodology (Define, Measure, Analyze, Improve and Control), enabling a systematization of the process, increasing its efficiency and offering greater clarity to the steps taken. Thus, it is intended to reduce the expenditure of electricity through new procedures for efficient use considering the consumption profile of the Campus. In a period of six months, it was possible to obtain an average monthly reduction of 25% of the total consumption of electricity. The management system has been implemented for a short time, yet it is well structured, with clear steps and satisfactory results, contributing to systematic improvements and efficiency in the use of economic resources.

KEYWORDS: Energy management, Energy efficiency, Sustainability.

1 | INTRODUÇÃO

A gestão de energia é uma busca por ações que proporcionem melhorias no desempenho energético e assim reduzir custos com as faturas. No uso da energia elétrica, as ações corretivas estão relacionadas a mudanças de comportamento e, portanto, envolvem uma abordagem multidisciplinar com significativos esforços educacionais de curto e longo prazo.

A Lei No 10.861/2004 assegura ao Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES) avaliar a responsabilidade social das Instituições de Ensino Superior (IES). É missão das IES transmitir conhecimento científico, inovação e valores para as futuras gerações. A Rede Federal de Ensino assume grande representatividade no cenário atual da educação. Em 2019, a Rede Federal estava composta por 38 Institutos Federais, 661 campi associados e distribuídos entre as 27 unidades federais do país (MEC, 2019). Segundo Pacheco (2015), uma das finalidades dos Institutos Federais é atuar em favor do desenvolvimento local e regional na perspectiva da construção da cidadania. Cientes da relevância do desenvolvimento sustentável, é papel da rede educacional incorporar questões com a temática ambiental.

O Instituto Federal da Bahia (IFBA), vem atuando desde 2013 em ações de sustentabilidade ambiental, cujo ápice dessas atividades foi o prêmio Ideia, uma iniciativa que promove debates sobre sustentabilidade nas instituições federais de educação, proporcionando a instituição o ganho de recursos na ordem de R\$ 2,5 milhões para investimentos na geração de energia renovável. Parte desse recurso foi investido na instalação de 165 kWp em painéis solares fotovoltaicos no Campus Salvador, gerando, aproximadamente, 240.000 kWh/ano.

Em 2019, a geração de energia proporcionada pelos painéis solares apresentou uma economia média mensal de, aproximadamente, R\$ 7.000,00, com geração reduzida

durante o inverno e aumentada durante o verão (como esperado). Entre o período de sua implantação, janeiro de 2017, e dezembro do ano 2019 (ano de estudo) os painéis solares proporcionaram uma economia de quase R\$ 270.000,00 (TANIMOTO, 2020).

O custo com energia elétrica na instituição é um dos itens consumíveis de maior orçamento. Ainda nesse mesmo ano, foi aprovado preliminarmente o orçamento de R\$ 1.350.000,00, porém esse valor diminuiu com os cortes orçamentários que ocorreram ao longo do ano. Considerado um corte de 20%, o valor disponível seria R\$ 1.080.000,00, porém, baseado no consumo de 2018 (R\$ 1.180.000,00) e com a perspectiva do reajuste no valor da tarifa de 10%, pudemos estimar o total de R\$ 1.240.000,00, proporcionando um déficit de R\$ 160.000,00 (TANIMOTO, 2020).

Quanto a legislação tarifária, de acordo com a Resolução nº 414/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a instituição analisada se enquadra na tarifa verde - subgrupo A4. Tal modalidade requer um contrato específico com a concessionária de energia, sendo a Coelba a responsável regional.

Além disso, possui demanda contratada (obrigatoriamente disponibilizada pela concessionária paga integralmente pela instituição sendo utilizada ou não) de 450 kW. A ultrapassagem desse número acarreta em multas por ultrapassagem de demanda, esse excesso é cobrado na fatura mensal com valor correspondente ao triplo do preço pago pela demanda ativa, se contratada fosse. O valor pago pelo consumo no horário de ponta (18:00 às 21:00 na Bahia) representa a cerca de 48% do valor total da conta de luz (TANIMOTO, 2020).

O infortúnio reside nas altas quantias destinadas ao pagamento das contas de energia elétrica, sendo um fator recorrente a ultrapassagem da demanda contratada. Um dos propósitos deste trabalho é sanar custos com excedentes da demanda ativa e diminuir o consumo de energia no horário de ponta, já que juntos correspondem a cerca de 59% do valor na conta de luz, divulgando as informações para a comunidade acadêmica e propondo hábitos de consumo mais eficientes, visto que são escassos os recursos para investimento.

Logo, o presente estudo tem como objetivo abordar a gestão da energia elétrica no Instituto Federal da Bahia, Campus Salvador, elaborando estatística de dados, indicadores de consumo e procedimentos de melhoria.

O modelo de Gestão da Qualidade six sigma é uma estratégia gerencial disciplinada, caracterizada por uma abordagem sistêmica e pela utilização intensiva do pensamento estatístico, que tem como objetivo reduzir drasticamente a variabilidade dos processos críticos e aumentar a lucratividade das empresas, por meio da otimização de produtos e processos (GONÇALES FILHO, 2020). O método DMAIC, proposto pelo modelo six sigma, é um processo de resolução de problemas composto por cinco etapas (CORDEIRO, 2019), que se comportam de forma cíclica estabelecendo um processo de melhoria contínua.

O primeiro passo, *Define*, é definir o problema, identificar as oportunidades de melhoria, estabelecer objetivos e as metas desejadas. A segunda etapa, *Measure*,

consiste em aprofundar o problema descrito a fim de detalhar os processos envolvidos. Na fase *Analyze*, as informações obtidas são analisadas a fim de determinar as causas fundamentais dos custos empregados com energia elétrica. A etapa *Improve*, consiste em desenvolver ideias de melhorias visando eliminar a causa raiz. Na última etapa, *Control*, verifica-se o desempenho do plano de ação para garantir que os resultados pretendidos sejam alcançados e estudar a existência de algum item que possa ser melhorado (OROZCO, 2009).

2 | METODOLOGIA

Este trabalho foi baseado em pesquisas sobre metodologias de gestão implantadas em instituições de ensino e na coleta de dados referentes ao consumo de energia elétrica no Campus. A partir destas informações foi possível traçar de forma objetiva o perfil consumidor da instituição e identificar pontos de melhoria. A coleta de dados foi realizada com base em planilhas contendo o consumo de energia por pavilhão e por equipamentos, contas de energia e relatórios de projetos desenvolvidos através dos editais da Comissão Interna para a Sustentabilidade Ambiental (CISA) compreendidos entre os anos de 2018 e 2019.

Foi importante conhecer os componentes e a estrutura de uma conta de luz, como o consumo é medido, qual componente é mais oneroso, em qual tarifa o estabelecimento se encaixa, os horários de funcionamento e as atividades realizadas. A partir dessa análise, foi possível entender e controlar os recursos financeiros empregados, estabelecendo a viabilidade e relevância econômica do projeto.

Realizando o levantamento do consumo de energia e o perfil de consumo no Campus, foi possível identificar os principais consumidores de energia elétrica. Essas informações foram adaptadas à luz do método DMAIC, que ofereceu maior clareza às etapas do projeto. Em seguida, foram realizados encontros de cunho informativo com os principais gestores de departamentos, para organizar as ideias de realização do trabalho e implementar medidas de redução dos gastos.

3 | RESULTADOS

A primeira etapa do projeto, *Define*, definiu como meta reduzir custos devido ao consumo da energia elétrica, cuja concessionária de eletricidade local é a Coelba.

Na fase de medição, *Measure*, os dados coletados foram analisados estatisticamente. Em 2018, foi evidenciado que na maior parte dos meses do ano ocorreram ultrapassagem de demanda contratada, acarretando em multas (Figura 1).

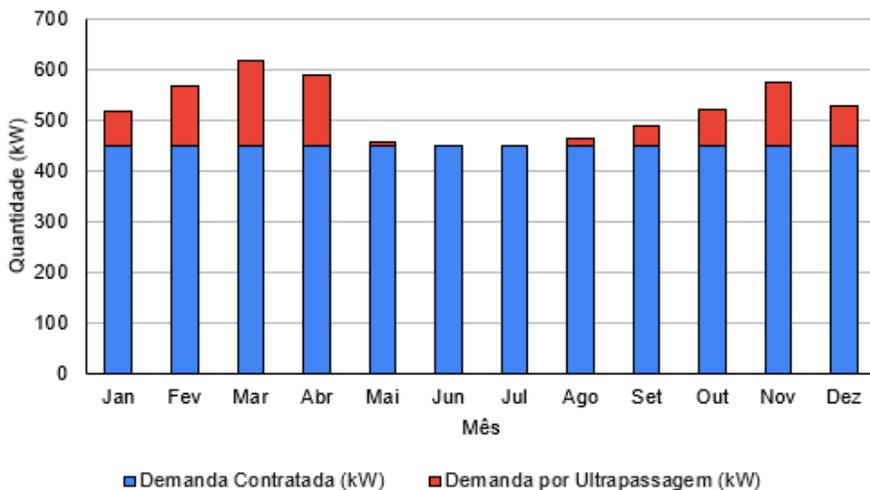


Figura 1 - Evolução da demanda ativa na Instituição no ano de 2018.

Fonte: Elaborado pela equipe do projeto, 2020.

A situação se manteve durante o primeiro semestre de 2019, Figura 2, sem uma tendência de redução do consumo da energia elétrica durante o primeiro semestre, pois até então não havia uma ampla divulgação e ações de minimização.

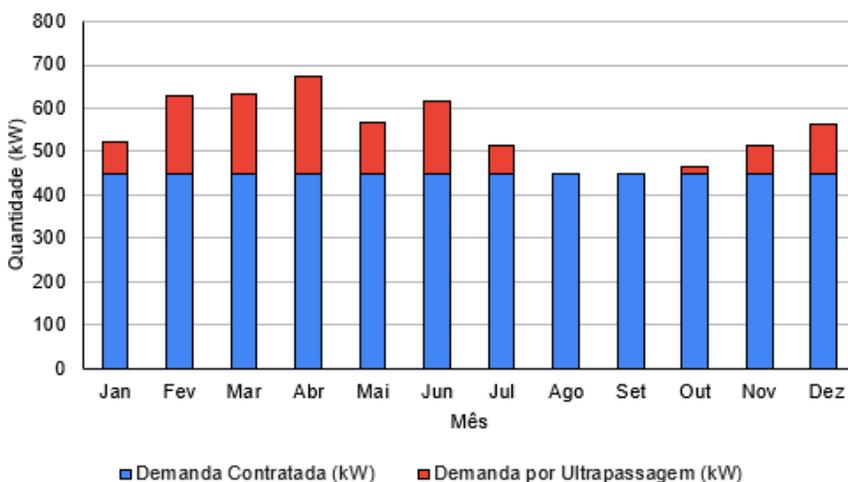


Figura 2 - Evolução da demanda ativa na Instituição no ano de 2019.

Fonte: Elaborado pela equipe do projeto, 2020.

Outro fator importante é o custo da multa com a demanda excedente, que equivale ao triplo do valor pago pela demanda contratada. Em 2019, foi constatado que nos meses

de fevereiro, março e abril, o valor da multa chegou a ultrapassar o valor pago pela demanda contratada. O horário de funcionamento do Campus é estabelecido entre o período das 7:00h às 22:00h. O fluxo de alunos é maior durante a noite, quando são ministradas aulas para os cursos superiores e técnicos subsequente. Por isso, a demanda de energia é alta nesse período que engloba o horário de ponta.

Entre os principais gastos com energia elétrica no Campus, o custo com o consumo no horário de ponta corresponde a 46% do valor total. O segundo maior gasto se dá no horário fora de ponta (32%) e, em seguida, o custo com a demanda contratada (12%). As multas com ultrapassagem de demanda e atraso de pagamento, juntas, correspondem a 10% dos gastos com energia elétrica, Figura 3.

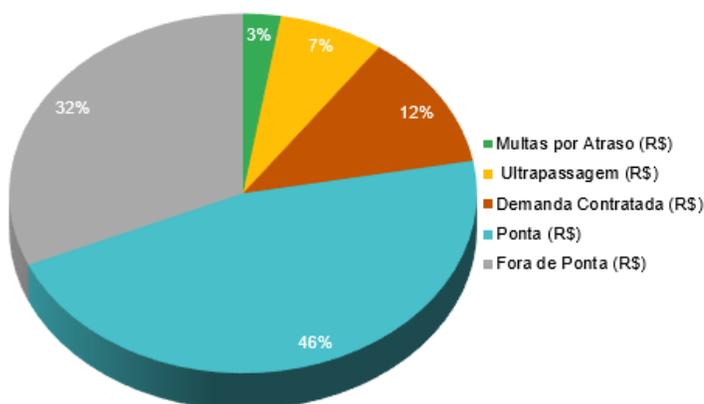


Figura 3 - Gastos com energia elétrica em 2019.

Fonte: Elaborado pela equipe do projeto, 2020.

No ano de 2019, o consumo na ponta atingiu 16% do valor de consumo total. No entanto, a tarifa de consumo na ponta equivale a sete vezes a tarifa do consumo fora da ponta, chegando a ser responsável por, aproximadamente, 60% do custo destinado ao consumo de energia.

Na terceira fase, *Analyse*, a partir do inventário contendo a potência e comportamento do consumo energético dos equipamentos elétricos por setor, foi possível discriminar a porcentagem de consumo de cada setor e equipamento. A maior demanda de energia é empregada no bloco A (administrativo), 25% do consumo total do Campus,

Numa visão mais abrangente, foi possível simular os equipamentos responsáveis pelo elevado consumo energético da Instituição e os equipamentos com maior consumo foram: ar condicionado, estimando-se mais da metade do gasto energético, e em seguida lâmpadas e computadores.

Durante a realização do trabalho foram realizadas inspeções nos ambientes que

apresentaram padrão de consumo elevado encontrando-se as situações a seguir:

- Aparelhos de ar configurados com temperaturas muito baixas, por exemplo 20°C; mal dimensionados; com baixa eficiência; e instalados em ambientes inadequados, como salas sem vidros em algumas janelas;
- Uso de aparelhos em salas onde não estão sendo realizadas atividades. Salas justificadas, em alguns casos, pela adaptabilidade de equipamentos eletrônicos às condições do ambiente;
- Equipamentos elétricos (ares condicionados) ligados indevidamente por 24 h diárias;
- Negligência ao sair da sala e não desligar luzes e ares condicionados.

Na quarta fase, *Improve*, uma vez identificados os maiores consumidores de energia elétrica na instituição, foi possível realizar estudos de casos para determinar a melhor maneira de reduzir o consumo, como descrito abaixo:

- Considerando o alto custo demandado durante o horário de ponta, foi sugerido que houvesse uma redução da atividade de aparelhos elétricos nesse período, assim como o desligamento de um aparelho de ar condicionado na biblioteca central (eram cinco em funcionamento);
- Diminuição na quantidade de lâmpadas em pontos não prioritários, como ante salas e banheiros;
- Uso de apenas um elevador por vez, no bloco administrativo, já que existem dois em funcionamento;
- Foi estimulado que houvesse um monitoramento do uso de aparelhos de ar condicionado por colaboradores técnicos-administrativos e regulação do termostato, evitando temperaturas muito baixas;
- Priorização por ventilação natural em salas de escritórios no período noturno;
- Desligamento de ares condicionados em algumas salas, que funcionam 24 h por dia por causa da presença de hub de internet e laboratórios de informática;
- Implantação de avisos e informes nas salas de aula alertando o desligamento dos aparelhos e lâmpadas após o fim das atividades;
- Criação da Comissão Interna de Conservação da Energia – CICE,
- Divulgação nas reuniões com chefes dos departamentos e coordenadores de cursos dos desvios pontuais e rotineiros em relação ao consumo da energia.

A última etapa, *Control*, referente ao desempenho das atividades implementadas, consistiu em garantir que os resultados pretendidos fossem alcançados. O plano de gestão da energia elétrica para o campus possibilitou a obtenção de melhorias sistemáticas a partir

das informações coletadas dos projetos anteriores (SILVA, 2017). Desde que as ações foram implementadas (entre agosto e dezembro de 2019) com mais rigor e acompanhamento contínuo foi possível observar, a partir dos novos valores da conta de energia mensal, um ganho acumulado de, aproximadamente, R\$ 220.000,00 como mostra a Figura 4.

A tendência de ganhos foi modificada no mês de dezembro 2019. Um dos motivos foi que em 2018 houve um quantidade de aulas 20% menor que em 2019 no período contabilizado, mesmo abatendo esses dias, foi demandante para a descontinuidade dessa tendência, o relaxamento dos procedimentos de minimização estabelecido pelo plano.

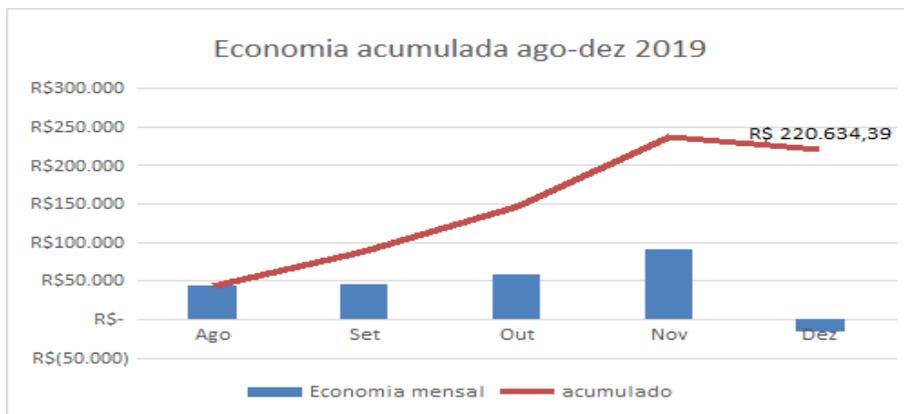


Figura 4 - Economia acumulada após implementação do plano de gestão em 2019.

Fonte: Tanimoto, 2020.

Notou-se a não ocorrência de multas por ultrapassagem da demanda contratada nos meses de agosto, setembro e outubro de 2019 (meses em que as medidas de gestão foram efetivadas). O custo de consumo no horário de ponta, que chegou a atingir cerca de R\$ 74.000 no mês de abril, atingiu uma média de, aproximadamente, R\$ 53.000 nos meses de agosto a novembro.

Já foi simulado e solicitado a concessionária de energia, um aumento na demanda contratada de 450 kW para 600 kW, porém com a suspensão das aulas devido à pandemia do covid-19, o pedido está suspenso junto à concessionária.

4 | CONCLUSÕES

Uma vez identificados os maiores consumidores de energia elétrica na instituição foi possível realizar estudos de casos para determinar a melhor maneira de reduzir este consumo. Os grandes desafios foram o grau de aceitação da mudança de comportamento que a comunidade precisa apresentar, a falta de recursos para investimentos em tecnologias mais eficientes e a baixa adesão pelos docentes pesquisadores em projetos de pesquisa e

desenvolvimento em eficiência energética.

Deve-se destacar que no mês de dezembro não houve comprometimento eficaz e algumas medidas deixaram de ser seguidas, levando ao aumento do consumo e existência de multas por ultrapassagem de demanda. Desconsiderado o mês de dezembro, os meses de agosto à novembro do ano 2019 apresentaram uma média equivalente a 25% de redução no consumo quando comparado ao mesmo período de 2018.

O sistema de gestão de energia da instituição vem sendo implantado há pouco tempo, ainda assim, mostra-se bem estruturado, com etapas claras e grande influência de metodologias provenientes da área de gestão da qualidade. Não existem dúvidas sobre a importância do presente projeto ao cenário de redução de consumo do Campus, no entanto será necessário o comprometimento de discentes e docentes, com o intuito de tornar a redução dos gastos com energia uma realidade no Campus, adotando as recomendações descritas nos resultados.

REFERÊNCIAS

ANEELS - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Número 414**. 9 set 2010, 147 p. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>. Acesso em: 1 jul. 2020.

CORDEIRO, D. R.; ROCHA, R. P. Aplicação da metodologia DMAIC para redução do índice de perdas de embalagem. *In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL*, 13., 2019, Campo Mourão. **Anais [...]** Campo Mourão: Universidade Estadual do Paraná, 2019. ISSN 2176-3097.

GONÇALES FILHO, M.; DELBONI, C. Levantamento Sobre a Evolução da Abordagem Lean e Six Sigma. **Brazilian Journals of Business**, Curitiba, v. 2, n. 1, p.473-489, jan/mar. 2020.

OROZCO, J. S. M. Reducción de Gasto Energético Eléctrico Usando Seis Sigma. **Producción + Limpia**, Antioquia, v. 4, n. 2, p.90-102, jul/dez. 2009.

PACHECO, E. **Fundamentos Político-pedagógicos dos Institutos Federais**: diretrizes para uma educação profissional e tecnológica transformadora. Natal: IFRN, 2015. *E-book*. 66 p. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/1018/Fundamentos%20Poli%CC%81tico-Pedago%CC%81gicos%20dos%20Institutos%20Federais%20-%20Ebook.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 jul. 2020.

SILVA, E. L. S.; TANIMOTO, A. H. Identificação dos Principais Consumidores de Energia Elétrica no IFBA, Campus Salvador. *In: Relatório Final de Extensão*, Instituto Federal da Bahia, Salvador, 2017.

TANIMOTO, A. H., CAD M. M. **Relatório do Plano de Gestão da Energia Elétrica do campus Salvador**. Comissão Interna para a Sustentabilidade Ambiental - CISA. Salvador: IFBA, 2020.

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

Data de aceite: 01/06/2021

Jaimis Sajid León Colqui

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

Sérgio Kurokawa

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

Anderson Ricardo Justo de Araújo

Department of Electrical Engineering
Sao Paulo State University (UNESP)
Ilha Solteira, SP, Brazil

José Pissolato Filho

School of Electrical and Computer Engineering
State University of Campinas (UNICAMP)
Campinas, SP, Brasil

ABSTRACT: Numerical spurious oscillations are present in transient responses when overhead transmission lines (TL) are represented by the lumped parameter models (LPM) which can be composed of π , T or L branches in cascade. These spurious oscillations present erroneous peaks which can lead to incorrect interpretations in the protection devices and overestimation in the insulation level of equipment, such as insulation strings, pre-insertion resistor, circuit breakers. In the literature, modified π -circuit topologies are proposed with damping resistances inserted to reduce the magnitude of these spurious oscillations. However, the effects of the damping

resistances in the T and L -circuit topologies are unknown. In this article, a transient analysis of each modified topology is carried out for different damping resistances. Simulations obtained with the modified T and L topologies are compared with those obtained with numerical inverse Laplace transform and with traditional LPM (without damping resistances). Results shown that a significant reduction of spurious oscillations are seen when the modified topologies are employed for the transient responses. In this way, the modified topologies can be an alternative to represent symmetrical and ideally transposed overhead three-phase TL and can be applied to study the electromagnetic transients in power systems.

KEYWORDS: Electromagnetic transients; transmission line; lumped parameter models; time domain, modified topologies.

ANÁLISE TRANSITÓRIA DOS MODELOS CLÁSSICOS E MODIFICADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARÂMETROS CONCENTRADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

RESUMO: As oscilações espúrias estão presentes nas respostas transitórias quando linhas de transmissão (LT) são representadas pelo modelo a parâmetros concentrados (MPC). O MPC é composto por circuitos π , T ou L conectados em cascata. Essas oscilações são caracterizadas por picos errôneos que podem levar às interpretações incorretas nos sistemas de proteção. Da literatura, são propostas topologias de circuitos π modificadas pela inserção de resistências de amortecimento que reduzem as

oscilações espúrias. Entretanto, nas topologias T e L , esses efeitos são desconhecidos. Neste artigo, uma análise das respostas transitórias de cada topologia é realizada para diferentes valores da resistência de amortecimento. Os resultados obtidos com as topologias T e L são comparadas com os obtidos pelo método da transformada numérica inversa de Laplace e pelo MPC clássico. Verifica-se uma redução expressiva das oscilações espúrias nas respostas transitórias quando as topologias modificadas são empregadas. Desse modo, essas topologias são modelos alternativos para representação de LT trifásicas simétricas e idealmente transpostas e podem ser aplicadas para estudar os transitórios eletromagnéticos.

PALAVRAS-CHAVE: Transitórios eletromagnético; linha de transmissão; modelos a parâmetros concentrados; domínio do tempo, topologias modificadas.

1 | INTRODUCTION

Several models are proposed to represent overhead transmission lines (TL) in the literature which they are developed in the frequency or time domain, presenting their own advantages and characteristic limitations. The TL models developed in the frequency domain are limited when non-linear loads are inserted in the TL or in the studies of faults in the electrical power systems. Additionally, transient responses are calculated by inverse Laplace or Fourier transforms implemented via numerical methods, which due to the complexity of this conversion, a high computational time and cost may be required [1]. Thus, TL models developed directly in the time domain are preferred in transient electromagnetic studies in power systems.

In this context, the lumped parameter transmission line models (LPM) has been used extensively in the literature to represent short overhead TL [2]–[4]. The LPM considers that a generic overhead TL can be represented by longitudinal and transversal branches of circuits in the form π , T or L connected in cascade, as further detailed. In these LPM, the currents and voltages along a certain overhead TL are represented by a system of state equations whose solutions are obtained by numerical integration methods [3]. The LPM allows the insertion of non-linear loads, such as rectifiers and surge arresters, the study of faults at any point of the line and the inclusion of the Corona effect in the electromagnetic simulations [4], [5]. However, numerical spurious oscillations resulting from the numerical methods employed to calculate the currents and voltages associated with lumped representation occur in the transient responses.

These oscillations are provoked due to the fact that the distributed electrical parameters are represented by lumped parameters in cascade. Such spurious oscillations are characterized by high-amplitude erroneous peaks that distort transient responses. These oscillations do not adequately represent the transient responses and can cause incorrect analyzes in the time domain, affect the operations of the protection equipment and oversize the electrical supportability in the chain of insulators, pre-insertion resistors and lightning arrestors. In order to mitigate oscillations some methods are proposed in the literature, such as: (i) the use of digital and analog filters [6], [7]; (ii) by adjusting the numerical methods

of integration [8] and (iii) by representing TL through a cascade of circuits π with modified lumped topologies [6], [9]. This last alternative inserts a damping resistor in parallel to the longitudinal branch or a damping resistor in series to the branch transverse to the classical π circuit in cascade. However, other topologies such as T and L , have not been studied with the insertion of the damping resistances in their structures in the literature.

In this article, the performance of two modified LPM topologies formed by the cascaded T and L circuits with damping resistances is investigated. These two topologies are employed to represent a symmetrical and ideally transposed overhead three-phase TL submitted to a energization maneuver and to mitigate spurious oscillations in the transient responses directly in time domain using modal decomposition technique. These transient responses are compared with those results obtained with distributed parameter model calculated by the numerical inverse Laplace transform and with those obtained with the classical LPM (without damping resistances). Results show a significant reduction in spurious oscillations in transient responses when modified topologies are employed to represent the three-phase TL. The proposed topologies are shown as effective alternative models to represent symmetrical and ideally transposed three-phase TL which can be applied to study the electromagnetic transients for this type of disturbance.

2 | LUMPED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL

In this section, the classical LPM and the modified π , T , and L circuits in cascade are presented. The LPM represents a TL whose electrical parameters are distributed along its length, per-unit-length (p.u.l.), by lumped parameters connected in the branches of π , T , or L in cascade, as illustrated in Figs. 1, 2 and 3, respectively.

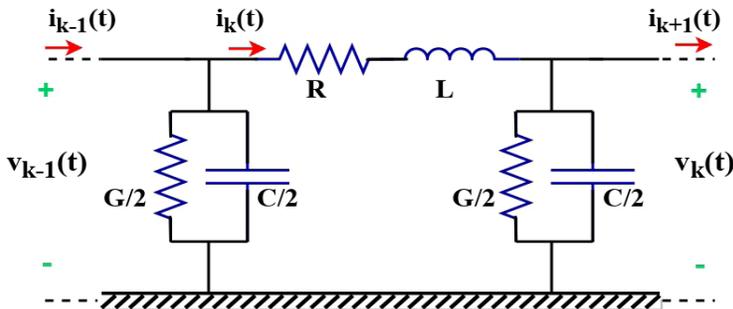


Figure 1: Unit of the classical π -circuit.

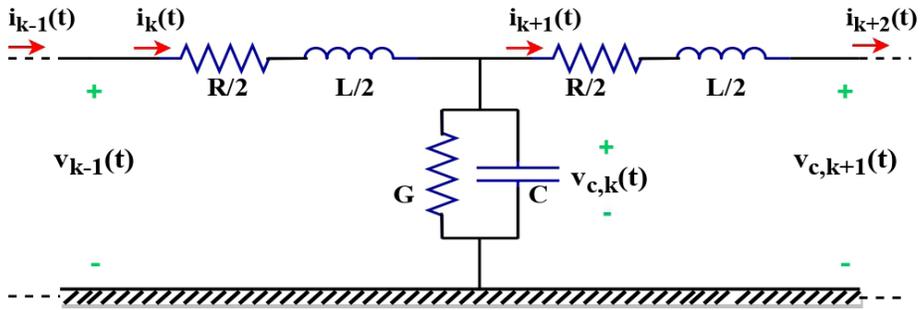


Figure 2: Unit of the classical T-circuit.

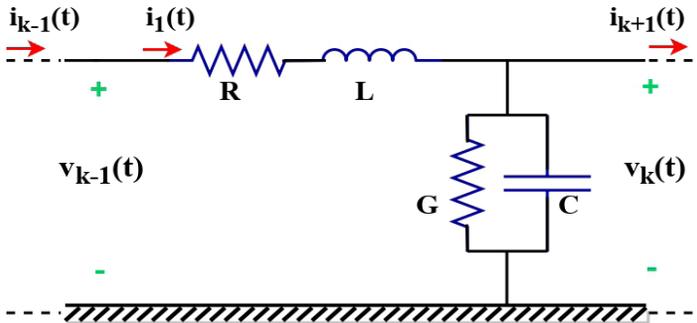


Figure 3: Unit of the classical L-circuit.

Each unit of lumped circuit is modeled by resistance R , inductance L , capacitance C and conductance G . These lumped parameters R , L , C and G are related to its respective distributed parameters, as follows [9]

$$R = R' \frac{d}{n}, \quad L = L' \frac{d}{n}, \quad C = C' \frac{d}{n}, \quad G = G' \frac{d}{n}, \quad (1)$$

where d is the line length and n is the number of cascaded lumped circuits. The terms R' , L' , C' and G' are the p.u.l. resistance, inductance, capacitance and conductance. Each circuit cascade unit has two state variables: transversal voltage $v_k(t)$ and longitudinal current $i_k(t)$. To assess all voltages and currents along the line length, it is necessary to employ a system of state equations, represented generically as follows [3]

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

$$y = Cx + Du. \quad (3)$$

In (2) and (3), x is the state variable vector for the continuous-time system, u is the input vector, y is the output vector, the state matrices A , B , C , D are matrices whose coefficients are related to lumped parameters and the matrix order depends on the number n . The solution of the state space equations is obtained by numerical integration methods such as Heun's method [3].

2.1 Classical LPM with π -circuits

Considering an overhead represented by the classical LPM with a cascaded π -circuits, each unit can be described as shown in Fig.1, where the currents and voltages at the both ends are shown. Applying Kirchhoff's laws to the generic π -circuit in Fig.1, the longitudinal current i_k and the transverse voltage v_k data are obtained as follows

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{k-1} - \frac{1}{L} v_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} - \frac{G}{C} v_k. \quad (5)$$

The matrices \mathbf{A} and \mathbf{B} and the state vector \mathbf{x} are given by

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = [i_1 \quad \cdots \quad i_n \quad v_1 \quad \cdots \quad v_n]^T, \quad (8)$$

where the sub-matrices \mathbf{A}_{11} , \mathbf{A}_{12} , \mathbf{A}_{21} e \mathbf{A}_{22} are written as follows

$$\mathbf{A}_{11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & -\frac{1}{C} \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{2}{C} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_{22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (12)$$

2.2 Classical LPM with T -circuits

When an overhead TL is represented by classical LPM with cascade T -circuits, as shown in Fig. 2, applying Kirchhoff's laws, the longitudinal currents and transversal voltages are given by

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{c,k-1} - \frac{1}{L} v_{c,k} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v_{c,k}}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} - \frac{G}{C} v_{c,k}. \quad (14)$$

The matrices \mathbf{A}_T , \mathbf{B}_T and \mathbf{x}_T written as state variables for this topology is given by

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{T11} & \mathbf{A}_{T12} \\ \mathbf{A}_{T21} & \mathbf{A}_{T22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} \frac{2}{L} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_T = [i_1 \quad \cdots \quad i_{n+1} \quad v_{c,1} \quad \cdots \quad v_{c,n}]^T, \quad (17)$$

where the matrices \mathbf{A}_{T11} , \mathbf{A}_{T12} , \mathbf{A}_{T21} e \mathbf{A}_{T22} are written as follows

$$\mathbf{A}_{T11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{T12} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \ddots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & -\frac{1}{L} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{2}{L} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{A}_{T21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{A}_{T22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (21)$$

2.3 Classical LPM with L -circuit

When a overhead TL is represented by classical cascaded T -circuits, as shown in Fig. 2, the state currents and voltages are given by

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = -\frac{R}{L}i_k + \frac{1}{L}v_{k-1} - \frac{1}{L}v_k \quad (22)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C}i_k - \frac{1}{C}i_{k+1} - \frac{G}{C}v_k, \quad (23)$$

where the matrices \mathbf{A}_L , \mathbf{B}_L and \mathbf{x}_L are written as follows

$$\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{L11} & \mathbf{A}_{L12} \\ \mathbf{A}_{L21} & \mathbf{A}_{L22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{B}_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

$$\mathbf{x}_L = [i_1 \quad \dots \quad i_n \quad v_1 \quad \dots \quad v_n]^T, \quad (26)$$

and the sub-matrices are

$$\mathbf{A}_{L11} = \text{diag}\{-R/L\} \quad (27)$$

$$\mathbf{A}_{L12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{A}_{L21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{A}_{L22} = \text{diag}\{-G/C\}. \quad (30)$$

2.4 LPM with damping resistance

In order to mitigate numerical oscillations, a modified π -circuit is proposed in the literature [6], [10]. In this topology, a damping resistance R_D is connected parallel to the longitudinal branch RL in the classical LPM. In this topology, the damping resistance R_D is given by [6]

$$R_D = K_d \frac{2L}{\Delta t}; \quad G_D = \frac{1}{R_D}, \quad (31)$$

where K_d is an adjustable factor that varies between 2 and 10 [6], [9]. The variable L is the longitudinal lumped inductance of the circuit and Δt is the step size employed in the simulations. This topology was employed to mitigate numerical oscillations and it consists of a simple method in the classical LPM. However, this damping resistance can be inserted in the modified topologies T and L , according to the following development.

2.5 Representation of the modified cascaded T -circuit

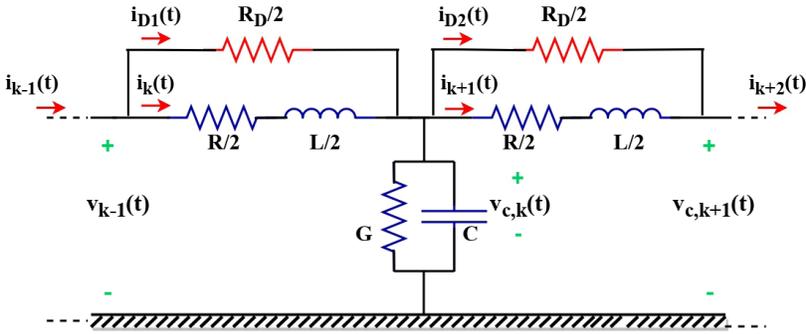


Figure 4: Unit of the modified cascaded T -circuit with parallel damping resistance R_D .

The modified cascaded T -circuit topology is proposed in order to reduce the spurious oscillations that occur in this type of topology, following the same idea as the modified π -circuit topology. For this, a damping resistance R_D is added in parallel to the longitudinal branch RL of the classical LPM T -circuit topology as shown in Fig. 4. Applying the Kirchhoff's laws in the modified cascade T -circuit topology, the state equations are written as follows

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = \frac{-R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{c,k-1} - \frac{1}{L} v_{c,k} \quad (32)$$

$$\frac{\partial v_{c,k}}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} + \beta' v_{c,k-1} - \alpha' v_{c,k} + \beta' v_{c,k+1}. \quad (33)$$

The variables α' and β' in (4) are defined as follows

$$\alpha' = \frac{(G+2G_D)}{c}; \quad \beta' = \frac{G_D}{c}. \quad (34)$$

Inserting the (4) in a state equation form, the state matrices are given by

$$\mathbf{A}'_T = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_{T11} & \mathbf{A}'_{T12} \\ \mathbf{A}'_{T21} & \mathbf{A}'_{T22} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{B}'_T = [2/L \ 0 \ \dots \ 2/G_D \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (36)$$

$$\mathbf{x}'_T = [i_1 \ \dots \ i_{n+1} \ v_1 \ \dots \ v_n]^T, \quad (37)$$

where the sub-matrices \mathbf{A}'_{T11} , \mathbf{A}'_{T22} , \mathbf{A}'_{T21} and \mathbf{A}'_{T12} are written as follows

$$\mathbf{A}'_{T11} = \mathbf{A}_{T11} \quad (38)$$

$$\mathbf{A}'_{T12} = \mathbf{A}_{T12} \quad (39)$$

$$\mathbf{A}'_{T21} = \mathbf{A}_{T21} \quad (40)$$

$$\mathbf{A}'_{T22} = \begin{bmatrix} -\alpha' & \beta' & \cdots & 0 \\ \beta' & -\alpha' & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \beta' \\ 0 & \cdots & \beta' & -\alpha' \end{bmatrix} \quad (41)$$

2.6 Representation of the modified cascaded L -circuit

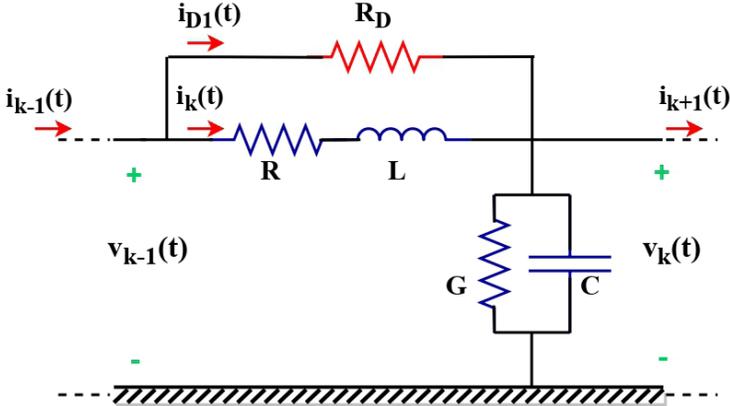


Figure 5: Unit of the modified cascaded L -circuit with parallel damping resistance R_D .

The second topology proposed to reduce spurious oscillations in the transient responses of the topology by L , is the modified L -circuit. This topology is represented by a damping resistance R_D added parallel to the longitudinal branch RL of the classical LPM L as can be seen in Fig. 5. The equations resulting from the analysis of the modified L -circuit are written as

$$\frac{\partial i_k}{\partial t} = \frac{-R}{L} i_k + \frac{1}{L} v_{k-1} - \frac{1}{L} v_k \quad (42)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{1}{C} i_k - \frac{1}{C} i_{k+1} + \beta' v_{k-1} - \alpha' v_k + \beta' v_{k+1}. \quad (43)$$

The variable α' and β' are computed as (34). The state equations for the modified cascaded L -circuit are given by

$$\mathbf{A}'_L = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_{L11} & \mathbf{A}'_{L12} \\ \mathbf{A}'_{L21} & \mathbf{A}'_{L22} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\mathbf{B}'_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \cdots & 0 & \beta' & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (45)$$

$$\mathbf{x}'_L = [i_1 \quad \cdots \quad i_n \quad v_1 \quad \cdots \quad v_n]^T. \quad (46)$$

The sub-matrices \mathbf{A}'_{L11} , \mathbf{A}'_{L12} , \mathbf{A}'_{L21} and \mathbf{A}'_{L22} are defined as follows

$$\mathbf{A}'_{L11} = \mathbf{A}_{L11} \quad (47)$$

$$\mathbf{A}'_{L12} = \mathbf{A}_{L12} \quad (48)$$

$$\mathbf{A}'_{L21} = \mathbf{A}_{L21} \quad (49)$$

$$\mathbf{A}'_{L22} = \begin{bmatrix} -\alpha' & \beta' & \dots & 0 \\ \beta' & -\alpha' & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \beta' \\ 0 & \dots & \beta' & -\frac{G+G_D}{c} \end{bmatrix}. \quad (50)$$

3 I MODIFIED LPM APPLIED IN THREE-PHASE LINES

The transient responses in a three-phase TL with a vertical symmetry plane and ideally transposed can be performed using the line decomposition. This line decomposition is carried out by Clarke's transformation matrix where this modal transformation matrix is composed by real and constant elements. For vertical symmetry plane and ideally transposed transmission line, the decomposed line is decoupled into its propagation modes where each mode is represented by three independent single-phase lines. The Clarke's matrix is given by [11]

$$\mathbf{T}_{\text{Clarke}} = \begin{bmatrix} 2/\sqrt{6} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix}. \quad (51)$$

The three-phase TL with a vertical symmetry plane and ideally transposed is represented by matrices of longitudinal impedances and transversal admittances which are given by

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (52)$$

where the components of the main diagonal are (Z_p) and outside the main diagonal are (Z_m). The elements of the transverse admittance matrix \mathbf{Y} have the same layout as the elements of the \mathbf{Z} longitudinal impedance matrix. When the TL is ideally transposed, Clarke's transformation matrix decouples the overhead line into its exact modes [11]. The equations that are used to decompose the ideally transposed three-phase TL into its propagation modes are expressed as

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^T \mathbf{Z} \mathbf{T}_{\text{Clarke}} \quad (53)$$

$$\mathbf{Y}_{\alpha\beta 0} = \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_{\text{Clarke}}^{-T} \quad (54)$$

Inserting (52) in (53) and in (54), it yields in the following matrices

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} Y_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Y_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Y_0 \end{bmatrix}. \quad (55)$$

In this technique, the modal transformation matrices separates an ideally transposed three-phase LT into three independent single-phase lines, so-called propagation modes, denominated in this work as: α , β and 0. A representation of the phase-domain to modal domain conversions are illustrated in Fig. 6.

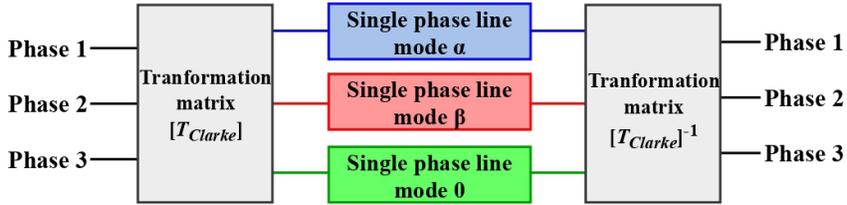


Figure 6: Representation of the modal decoupling in the three single-phase TL.

4 I VALIDATION OF THE MODIFIED TOPOLOGY

The performance of the modified topologies to calculate the transient responses in an ideally transposed three-phase TL is performed in this section. The Th used has a length of 50 km whose geometric configuration is shown in Fig. 7 and the internal (r_{int}) and external (r_{ext}) and the TL resistance (R_{dc}) are shown in Table 1.

Phase conductors	r_{int} [cm]	r_{ext} [cm]	R_{dc} [Ω/km]	NB
1, 2 and 3	0	1.53	0.03842	4

Table 1: Parameters of the phase-conductors.

In this table, the *NB* is the number of the conductors in the bundle. The three-phase TL is located on a resistivity soil ρ_e of 1,000 $\Omega.m$ based on the geometric data of the TL, the resistance matrices (\mathbf{R}'), inductance (\mathbf{L}') and capacitance (\mathbf{C}'), computed at the frequency f of 60 Hz, considering the ground-return impedance, computed by the Carson's approach, and the skin effect at this frequency. These matrices are given by

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 0.0691 & 0.0587 & 0.0587 \\ 0.0587 & 0.0691 & 0.0587 \\ 0.0587 & 0.0587 & 0.0691 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (56)$$

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} 1.9217 & 1.1454 & 1.1454 \\ 1.1454 & 1.9217 & 1.1454 \\ 1.1454 & 1.1454 & 1.9217 \end{bmatrix} mH/km \quad (57)$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 12.9116 & -2.2111 & -2.2111 \\ -2.2111 & 12.9116 & -2.2111 \\ -2.2111 & -2.2111 & 12.9116 \end{bmatrix} nF/km \quad (58)$$

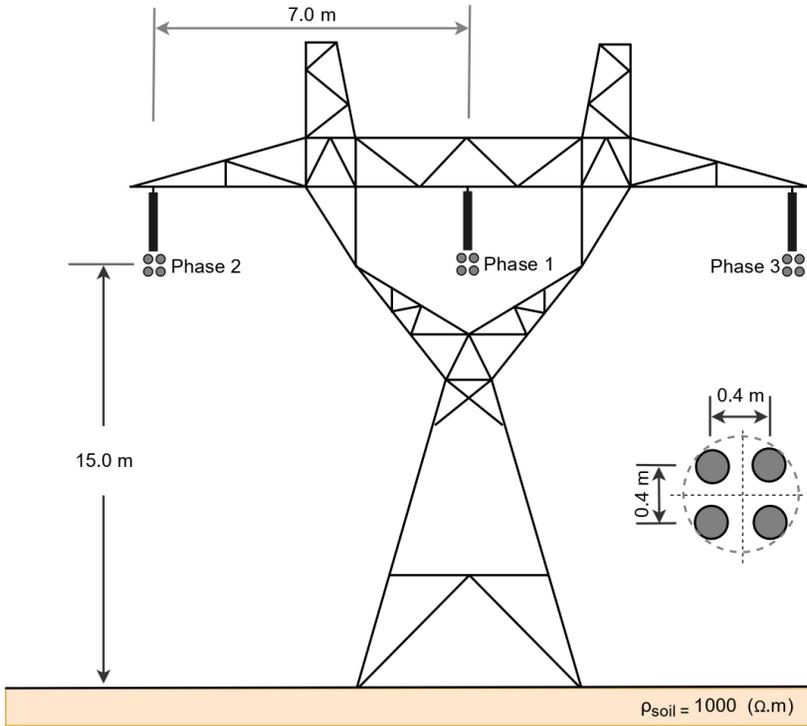


Figure 7: Three-phase line with vertical symmetry and ideally transposed.

The p.u. longitudinal matrix and transversal admittance matrix are given by

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}' + j\omega\mathbf{L}' \quad (59)$$

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{C}' \quad (60)$$

where $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency, in rad/s. The three-phase TL is decomposed using the Clarke's matrix and Eqs. (eq:3.3) and (54). Each propagation mode is represented by the classical LPM and the modified LPM in cascaded π , T and L -circuits with damping resistors. Once the transient responses are obtained for each independent mode, they are converted to the phase domain. In order to analyze the transient responses of the three-phase TL at the receiving end $V_m(t)$, the case illustrated in Fig. 8 is considered. The number of circuits employed in the modified T or L is 1 circuit/km and the time step $\Delta t = 0.5 \mu s$ is used in the simulations. In this case, the TL has at the sending end (k) a DC voltage source of $V(t)$ of 1 p.u. connected in phase 1, whereas the other phases are connected to ground. At $t = 0$, the TL is energized (switching maneuver) by this condition. At the receiving end (m), a three-phase resistive load of 2 k Ω per phase is considered and the voltages $V_m(t)$ are obtained. In the simulations of this work, the electrical parameters of the TL were considered constant due to the energization with a DC source (step voltage) that contains a low-frequency content. The ground-return impedance is calculated using the classical

Carson's approach.

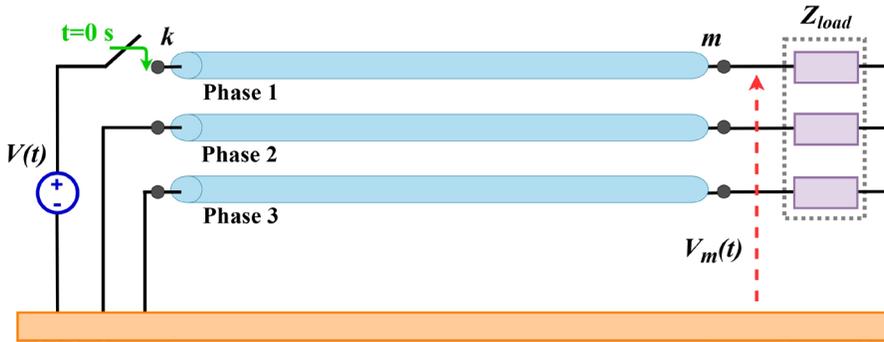


Figure 8: Three-phase TL energized by a DC voltage and three-phase balanced load at the receiving end.

The transient responses $V_m(t)$ are calculated using the classical LPM and the modified LPM for the topologies T and L -circuits. Several adjustment factors K_d are investigated in order to obtain the most significant reduction in spurious oscillations, as shown in Table 2, chosen from the most significant reductions in spurious oscillations in each α , β and 0 mode. The responses are compared with those obtained by the distributed parameter model that uses the numerical inverse Laplace transform (NLT) technique [12] considered the reference for the transient responses in this work.

	T-circuit			L-circuit		
	α	β	0	α	β	0
$K_{\alpha 1}$	10.0	10.0	8.00	10.0	10.0	8.00
$K_{\alpha 2}$	1.01	1.01	0.82	0.95	0.95	0.78
$K_{\alpha 3}$	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.08

Table 2: Values of K_d to the modified T and L -circuits employed in the simulations.

In Figs. 9 and 11 the transient voltages $V_m(t)$ of phase 1 are shown using the circuits T and L , respectively. The transient tensions $V_m(t)$ in phases 2 and 3 are shown Figs. 10 and 12 which they are identical due to the symmetry of the TL, using the T and L -circuits. The propagation time t_v is given by

$$t_v = d/v, \quad (61)$$

where d is the line length and v is the speed of the traveling waves. Adopting that $v \approx c$ (speed of light $c = 3e5$ km/s) and a line length d of 50 km, the $t_v \approx 0.165$ ms.

When the three-phase TL is energized at $t = 0$, traveling waves propagate along the

TL causing the surge voltage to rise at various points in the circuit. At the receiving end, after a propagation time t_v , the transient voltages at each phases is generated by the sum of the incident and reflected waves, which the amplitudes depend on the load impedance connected at receiving end, and on the inductive and capacitive couplings between overhead phase-conductors conductors. Thus, the induced voltages in phases 2 and 3 are produced during the switching maneuver of the TL. It can be noted from these figures that when there is a positive variation in the voltage of the phase 1 (Figs. 9 and 11), the induced voltages, in opposite polarity, are generated in adjacent phases 2 and 3 (Figs. 10 and 12), according to the Faraday's law of induction. In the steady state, the voltage in phase 1 will reach 1 p.u. the same value of the DC voltage applied by the source at the sending end, whereas the voltages in phases 2 and 3 will be zero.

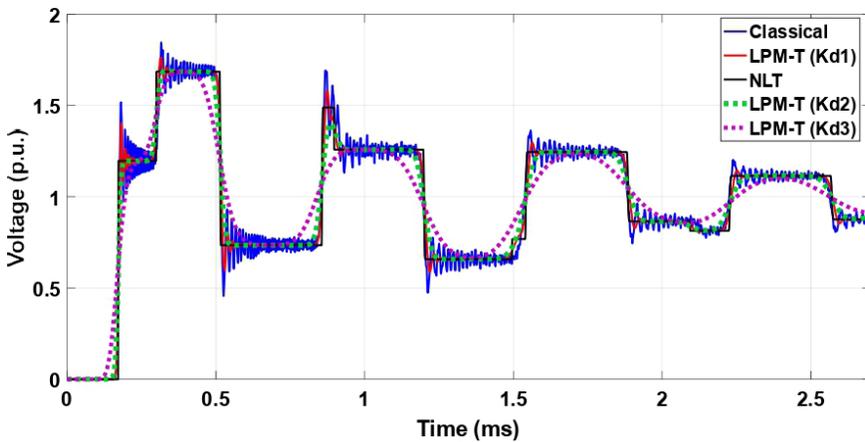


Figure 9: Voltage $V_m(t)$ at the phase 1 computed by NLT, classical LPM and modified cascaded T -circuits.

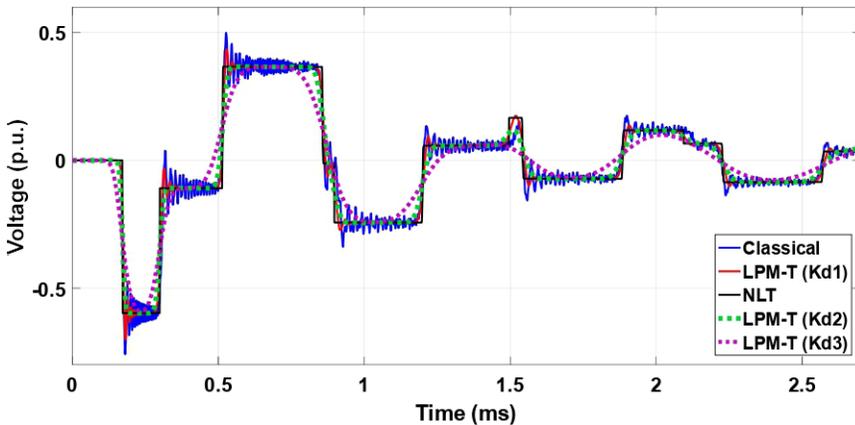


Figure 10: Voltages $V_m(t)$ at the phases 2 and 3 computed by NLT, LMP and modified cascaded T -circuits.

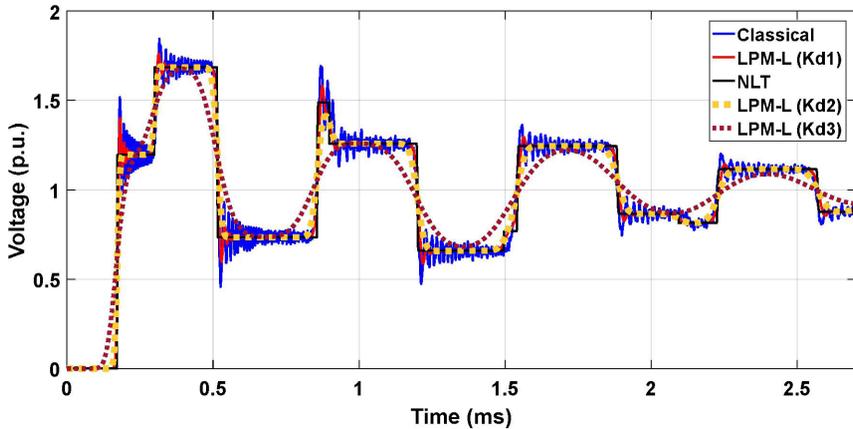


Figure 11: Voltage $V_m(t)$ at the phase 1 computed by NLT, classical LPM and modified cascaded L -circuits.

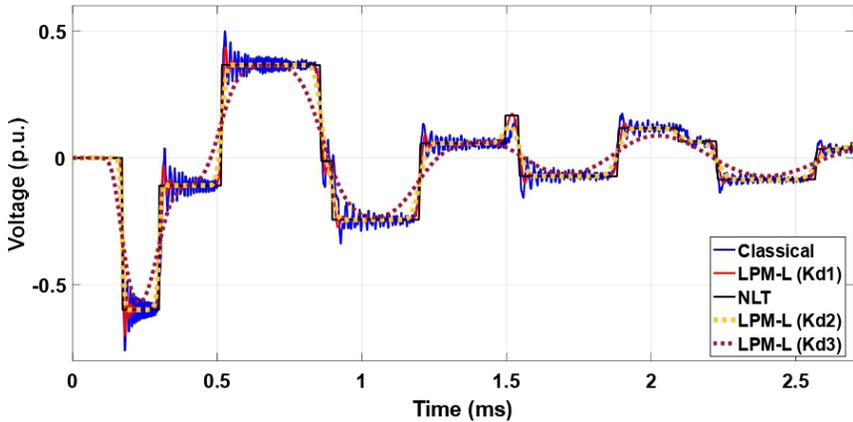


Figure 12: Voltages $V_m(t)$ at the phases 2 and 3 computed by NLT, LMP and modified cascaded L -circuits.

As shown in Figs. 9 to 12, it can be noted that the classical models have higher spurious oscillations which significantly distortion in the transient voltages in comparison with those responses obtained by the NLT. The proposed modified topologies, denominated by LPM- T and LPM- L for the modified cascaded T and L -circuit topology, respectively, show a significant reduction in spurious oscillations in all transient responses. This reduction is more pronounced for the lower adjustment factor K_d . However, high distortion is observed when a certain value of K_d is used in the simulations, for example, if the rise time in the modified LPM with the modified T -topology is less than the propagation time $t_v = 0.33$ ms, which occurs correctly in the classical LPM and NLT. These distortions in the rise time can lead to erroneous interpretations in the relay acquisition systems for protection against line faults using the traveling wave method [13]. Regarding numerical spurious oscillations, if these erroneous peaks are taken as a reference, the electrical insulation of the equipment

can be overestimated and also it may affect the coordination of the insulation of an electrical system.

In order to measure the magnitude of these erroneous peaks, the transient responses obtained by the modified classical LPM, NLT and LPM with the modified T and L -circuit models are shown in Figs. 13 and 14 in detail. In this case, the voltages obtained for LPM modified $T - k_{d2}$ and LPM modified $L - k_{d2}$ present the higher reductions with the lower distortion in transient responses. The peak values of the transient voltages obtained in the phases 1 and 2, as well as the errors (E) in % obtained in relation to those computed with the NLT technique are shown in Table 3. As seen from this table, the voltage peaks obtained by the classical LPM present higher deviations in comparison with obtained for the modified topologies. The highest error occurs for the voltage peaks computed for the phases 2 and 3. However, the modified topologies T and L present an excellent precision in comparison with the transient responses with the NLT technique.

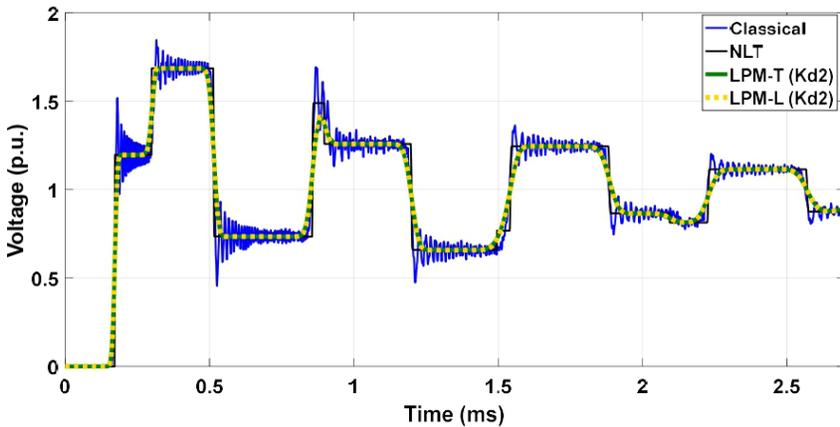


Figure 13: Voltage $V_m(t)$ for phase 1 employing modified cascaded T and L -circuits with k_{d2} .

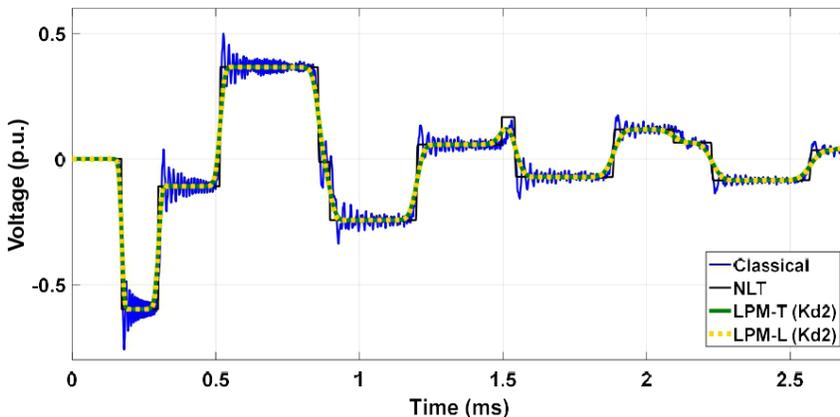


Figure 14: Voltages $V_m(t)$ for the phases 2 and 3, employing cascaded modified T and L -circuits with k_{d2} .

Model	Phase	E(%)	Phase	E (%)
NLT	1.707	-	-0.59	-
LPM	1.925	12.78	-0.74	20.27
LPM-T	1.709	0.12	-0.59	0.10
LPM-	1.710	0.18	-0.59	0.13

* computed at = 0.471 ms; ** computed at = 0.366 ms

Table 3: Transient voltages (p.u.) and error E(%) for the LPM models.

The main advantage of the modified LPM model is the direct application to represent three-phase TL and the direct reduction of numerical spurious oscillations without the need for analog or digital filters, or the frequency-domain transmission line representation that requires the use frequency-to-time domain conversion methods such as the Laplace or Fourier transforms.

5 | CONCLUSIONS

This article has presented the state space equations for the currents and voltages for the LPM with the classical cascaded π , T and L -circuits, and the modified cascaded T and L -circuits to represent overhead TL. These classical and modified topologies were employed to calculate the transient responses in a three-phase overhead TL submitted to an energization maneuver directly in time domain. The modified topologies with the cascaded circuits with a parallel damping resistor R_D has shown a good performance in the reduction of the numerical spurious oscillations in all the transient responses. In the modified topologies with cascaded T and L , the variation of the adjustment factor K_d has provided a significant mitigation of numerical spurious oscillations. Results have shown a significant attenuation between the classical LPM topologies, the NLT (reference model) and the modified LPM topologies employing the best K_d in all the simulations. In these time-domain transient responses, there is an excellent reduction in the peaks of transient voltages computed at the receiving end combining the lowest distortion in the rise time of the transient responses. Based on these results, the proposed modified topologies are efficient and can be used as models in the representation of a symmetrical and ideally transposed three-phase transmission lines, without frequency-domain transmission line modeling and the application of frequency-to-time domain methods required for the Laplace or Fourier transforms.

FUNDING

This study was financed by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Finance Code 001), by the São Paulo Research Foundation (grant: 2019/01396-1) and by the Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento

REFERENCES

- [1] N. F. De Jesus, C. P. da Costa, L. D. P. Fernández, and J. B. Castellero, “Estudo comparativo de três algoritmos de inversão numérica da transformada de Laplace,” *Rev. Bras. Comput. Apl.*, vol. 9, no. 1, p. 63, 2017.
- [2] L. M. Popović, *Practical Methods for Analysis and Design of HV Installation Grounding Systems*. Elsevier Inc., 2018.
- [3] J. A. R. Macías, A. G. Expósito, and A. B. Soler, “A Comparison of Techniques for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 894–903, 2005.
- [4] M. S. Mamiş, “Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 2, p. 200, 2003.
- [5] M. S. Mamiş and M. E. Meral, “State-space modeling and analysis of fault arcs,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 1–3, pp. 46–51, 2005.
- [6] A. I. Chrysochos, G. P. Tolaridis, T. A. Papadopoulos, and G. K. Papagiannis, “Damping of Oscillations Related to Lumped-Parameter Transmission Line Modeling,” *Int. Conf. Power Syst. Transients*, 2015.
- [7] A. R. J. De Araújo, S. Kurokawa, A. A. Shinoda, and E. C. M. Da Costa, “Mitigation of erroneous oscillations in electromagnetic transient simulations using analogue filter theory,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 41–48, 2016.
- [8] J. C. G. De Siqueira, B. D. Bonatto, J. R. Martí, J. A. Hollman, and H. W. Dommel, “A discussion about optimum time step size and maximum simulation time in EMTP-based programs,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 24–32, Mar. 2015.
- [9] J. S. L. Colqui, A. R. J. De Araújo, and S. Kurokawa, “Improving the performance of a lumped transmission line model used in electromagnetic transient analysis,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 21, pp. 4942–4951, 2019.
- [10] CIGRE, “The calculation of switching surges. III Transmission line representation for energisation studies with complex feeding networks,” 1979.
- [11] M. C. Tavares, J. Pissolato, and C. M. Portela, “New mode domain multiphase transmission line model-Clarke transformation evaluation,” in *POWERCON 1998 - 1998 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, 1998, vol. 2, pp. 860–864.

[12] P. Gómez and F. A. Uribe, "The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 116–123, 2009.

[13] P. M. Silveira, R. Seara, and H. H. Zurn, "Localização de faltas por ondas viajantes—uma nova abordagem baseada em decomposição wavelet," 2001.

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

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 06/03/2021

Lucas Luiz Lunarti

Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais
Belo Horizonte – MG
<http://lattes.cnpq.br/0505941061079867>

Maury Meirelles Gouvêa Júnior

Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais
Belo Horizonte - MG
<http://lattes.cnpq.br/7858474817873474>

RESUMO: A unidade de medição fasorial (PMU) é um dispositivo que permite a medição sincronizada da tensão e corrente de sistemas elétricos em microssegundos. As PMUs são instaladas em subestações do sistema de potência e suas medições são enviadas para ser processadas pelo Phasor Data Concentrator (PDC). Nos últimos anos, diferentes métodos aplicados para a alocação ideal de PMU foram abordados na literatura. A contribuição deste trabalho é, usando um algoritmo evolucionário adaptativo, encontrar a alocação ideal da PMU e aplicar na estimação de estados para o sistema teste do IEEE 14 barras.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo Evolucionário Adaptativo; Estimação de Estados; PMU; Sistemas Elétricos.

ADAPTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM APPLIED TO STATE ESTIMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS IN WAMS

ABSTRACT: A phasor measurement unit (PMU) is a device that allows synchronized measurement of the voltage and current of electrical systems in microseconds. PMUs are installed in substations of the electrical power system. In recent years, different methods for the optimal allocation of PMU have been reported in the literature. The present work contribution is, using an adaptive evolutionary algorithm, finding an ideal allocation of the PMU and apply it in the state estimation for the IEEE 14 bus test system.

KEYWORDS: Adaptive Evolutionary Algorithm; Electrical Power System; PMU; State Estimation.

1 | INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) possui diversas variáveis de grande importância para a sua correta operação. Para estimar as magnitudes destas variáveis são utilizados diversos modelos matemáticos para melhorar a eficiência da estimação de estados do SEP (LUNARTI e GOUVÊA JÚNIOR, 2020).

A estimação de estado (EE) é de grande importância para o sistema elétrico, pois, por meio dela, é possível estimar as grandezas elétricas do SEP através de um conjunto de medidas disponíveis. Atualmente a maior parte das medidas do SEP é proveniente de um sistema conhecido como SCADA, do inglês, Supervisory Control and Data Acquisition. O

principal equipamento de medição deste sistema é a Unidade Terminal Remotas (UTR). Porém, a PMU, do inglês, Phasor Measurement Unit tem ganhado bastante destaque no monitoramento do SEP (GHOSH, 2017).

As PMUs conseguem realizar medições de tensão e corrente fasoriais com uma taxa de amostragem na faixa de 60 medições por segundo, enquanto isso as UTRs realizam em média 1-2 medições por segundo e não fazem medições fasoriais do SEP (ABDELKADER, 2019).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é aplicar a alocação de PMUs na estimação de estados do SEP, buscando avaliar os efeitos desse equipamento no monitoramento do SEP.

2 I PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE PMUS

Com base na lei de impedância de Ohm, impedância de linha multiplicada por a corrente entre seus nós resulta em uma queda de tensão entre esses dois nós. Isso é apresentado em (1) onde a e b são nós, V_a e V_b são tensões de seus respectivos nós, I_{ab} e Z_{ab} representam respectivamente a corrente e a impedância entre o nó a e b (MANDICH et al., 2019).

$$V_a - V_b = I_{ab} Z_{ab} \quad (1)$$

A seguir são apresentadas três regras para garantir o monitoramento do sistema elétrico (MANDICH et al., 2019):

- Ao instalar a PMU na barra i , a tensão da barra i e as correntes de todas as barras conectadas a barra i são monitoradas;
- Ao instalar a PMU na barra i e esta barra está conectada a barra j , tem-se o monitoramento da tensão da barra i , a corrente entre a barra i e j , e pela Lei de Ohm é calculada a tensão da barra j ;
- Ao ter a tensão de duas barras que estão conectadas entre si, é possível pela Lei de Ohm calcular a corrente entre elas.

Com base na Lei de impedância de Ohm, a impedância da linha multiplicada pela corrente entre seus nós resulta em uma queda de tensão entre esses dois nós. Isso é apresentado em (1), onde a e b são barras, e são tensão das suas respectivas barras, e representam respectivamente a corrente e a impedância entre as barras a e b (MANDICH et al., 2019).

Com base nas três regras supracitadas, é possível monitorar o sistema elétrico completamente sem a necessidade da instalação da PMU em todas as barras do SEP, ou seja, é possível encontrar a alocação ótima de PMUs. O problema da alocação ótima de PMUs pode ser descrito conforme segue em (2) (MANDICH et al., 2019).

$$\min = \sum_{k=1}^n X_n C_n \quad (2)$$

Sujeito a

$$O_j \geq 1$$

$$\forall_j = 1,2,3,\dots,N$$

Onde:

O_j - Observabilidade do sistema;

n - número de barras do sistema;

N – Contingência do sistema;

C_n - Custo com a instalação da PMU na barra n ;

X_n - Variável binária que representa instalação ou não de PMU na barra n .

3 I ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Existem várias maneiras de resolver a estimativa de estado do sistema elétrico. O método WLS é um dos mais utilizados no setor elétrico (James e Bidu, 2015). O princípio básico da estimativa de estado WLS é apresentado nesta seção.

Com base em um conjunto de medições, a seguinte equação é formada (James e Bidu, 2015):

$$z = h(x) + e \quad (3)$$

onde,

z é o vetor de medidas

$h(x)$ são funções não lineares do vetor de estados (x);

e é o vetor dos erros das medidas

A matriz Jacobiana, $H(x)$ é apresentada a seguir,

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4)$$

A matriz Ganho, $G(x^k)$ é apresentada como,

$$G(x^k) = [H^T(x_k)R^{-1}H(x_k)]^{-1} \quad (5)$$

A matriz da covariância dos erros do x estimado é apresentado a seguir,

$$\text{Cov}(x) = H^T R^{-1} H \quad (6)$$

Finalmente, o vetor de estados é obtido como segue,

$$[x^{k+1}] = [x^k] + [G(x^k)]^{-1}[H^T R^{-1} H][z - h(x^k)] \quad (7)$$

Esse é um método iterativo e seu respectivo critério de parada é apresentado a

seguir,

$$\max|\Delta x^k| \leq \varepsilon \quad (8)$$

sendo

ε o limite de tolerância.

4 | ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO ADAPTATIVO APLICADO O PROBLEMA DA ALOCAÇÃO DE PMU E PDC

Na metodologia abordada, um algoritmo genético adaptativo (AGA) é aplicado na alocação ótima de PMU. A principal diferença deste algoritmo é sobre a alternância do processo do algoritmo genético, onde os operadores de crossover e mutação são adaptados alternadamente.

O algoritmo genético adaptativo utilizado foi proposto por Yang et al., (2016) com o objetivo de evitar a convergência prematura dos algoritmos evolucionários, fornecendo uma maior probabilidade de escapar de um possível ótimo local e encontrar um ótimo global.

No algoritmo genético tradicional, a operação de cruzamento geralmente é aplicada primeira e, em seguida, a operação de mutação. Ao longo das gerações, a diversidade da população tende a diminuir. Nesta condição, a operação de crossover pode não produzir grandes mudanças nos novos indivíduos (YANG et al., 2016).

Durante a verificação de satisfação deste algoritmo, se a verificação for verdade, a classificação média da população é relativamente próxima da aptidão máxima da população. O valor da função é maior do que $\pi/6$, analisando assim, a diversidade da população é relativamente concentrada. Nesta condição, a operação de mutação é realizada primeira, então as operações de crossover e seleção são executadas. Se a verificação de satisfação for negativa, significa que a aptidão média da população não está perto da aptidão máxima da população. O valor que da função é menor que $\pi/6$, analisando assim, a população está relativamente dispersa. Nesta condição, a operação de crossover é realizada primeira, então a operação de mutação é realizada e operação de seleção será realizada após essas duas operações (YANG et al., 2016). Assim, este artigo utiliza essa metodologia proposta por Yang et al., (2016) de acordo com o fluxograma na Fig. 1 abaixo.

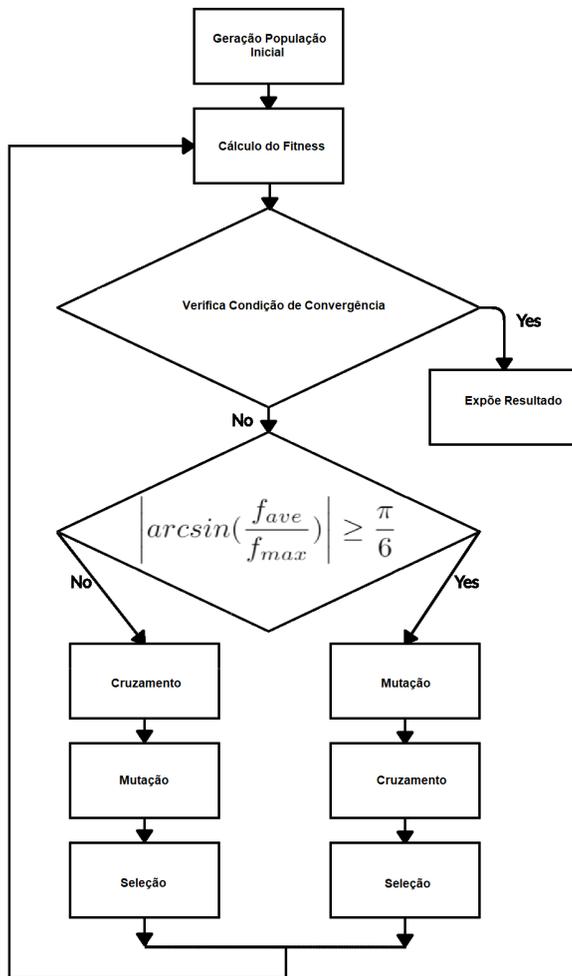


Figura 1 – Fluxograma Algoritmo Evolucionário Adaptativo (YANG et al., 2016).

5 | RESULTADOS

As entradas tradicionais do estimador de estado são provenientes do sistema SCADA, como fluxo de potência, injeção de potência e medições de magnitudes de tensão. O sistema é considerado como completamente observável se as medidas disponíveis forem suficientes para estimar o estado em tempo real do sistema. Diversos trabalhos na literatura apresentaram estimadores de estados híbridos, onde se tem medições através do SCADA e PMUs simultaneamente. Os resultados dos estimadores de estados híbridos apresentaram que, devido a sua alta precisão, a PMU tem incrementando de forma significativa a estimação dos estados do sistema elétrico.

A PMU mede diretamente o fasor de tensão do barramento onde está instalada

e o fasor de corrente das barras incidentes a esse barramento. A Figura 2 apresenta os erros da estimação do ângulo de tensão para um sistema de 14 barras do IEEE sem PMU instalada.

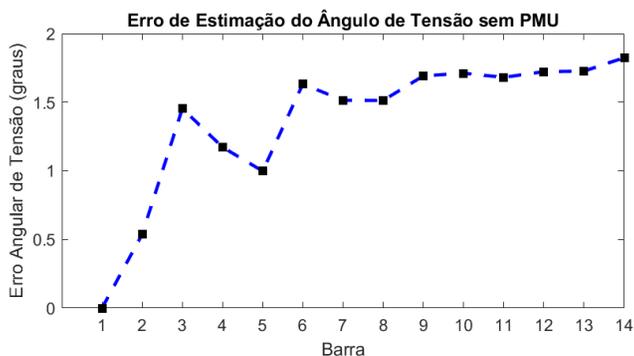


Figura 2 – Erro Estimação do ângulo de tensão sem PMU

A Figura 3 apresenta os erros da estimação do ângulo de tensão para um sistema de 14 barras do IEEE com PMU instalada. Note a redução significativa nos erros de estimação do ângulo de tensão com a instalação das PMUs

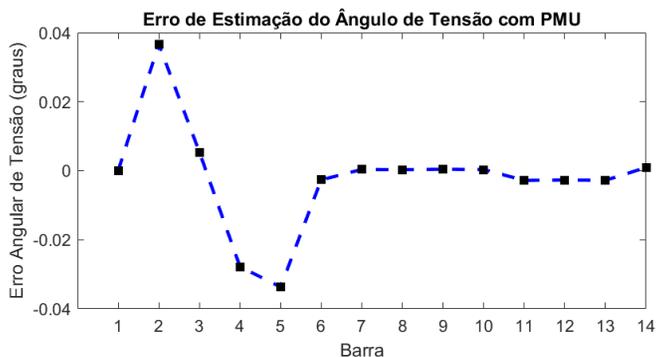


Figura 3 – Erro Estimação do ângulo de tensão com PMU

Conforme pode ser notado na Figura 1, uma inserção das medidas provenientes das PMUs como entrada do estimador de estados híbrido presentes de forma significativa os erros da estimação do ângulo de tensão. Os efeitos da inserção das PMUs podem ser verificados também referentes aos erros em relação à estimação da magnitude de tensão do sistema elétrico. A Figura 4 apresenta os erros em relação à estimação da magnitude da tensão em respeito ao sistema tradicional (sem PMU).

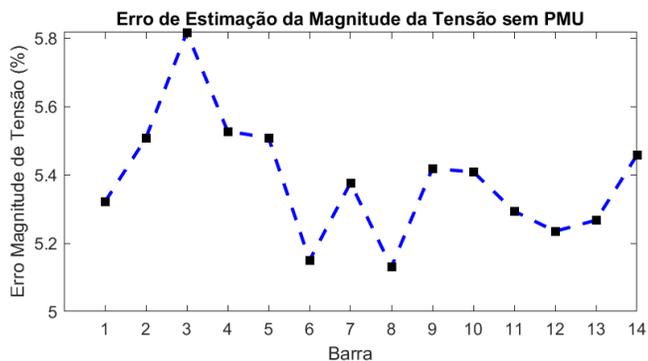


Figura 4 – Erro de Estimção de Magnitude de Tensão sem PMU

A Figura 5 apresenta os erros em relação à estimção da magnitude da tensão ao instalar PMUs em um sistema de 14 barras do IEEE.

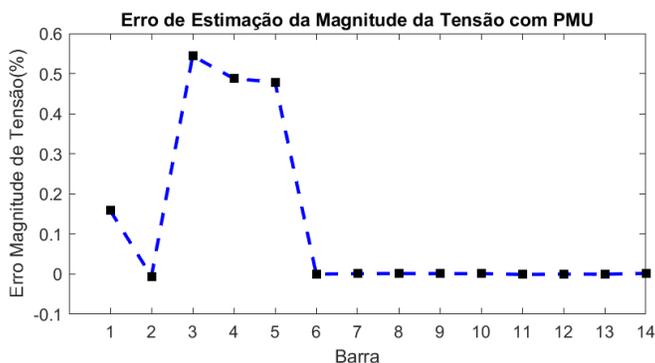


Figura 5 – Erro de Estimção da Magnitude de Tensão com PMU

6 | CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou um método para alocação de um WAMS, especificamente os equipamentos PMUs, em um sistema testes de 14 barras do IEEE e verificou a influência das PMUs na estimção de estados em sistemas elétricos de potência. Os resultados mostraram que, com esse novo sistema de monitoramento, os erros da estimção de estados do sistema elétrico diminuem de forma considerável, comprovando assim a importância de um método de alocação de PMUs.

REFERÊNCIAS

ABDELKADER, Mohamed et al. **Optimal placement of phasor measurement units for state estimation of electrical power systems**. In: 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2019. p. 1048-1052.

GHOSH, Pronob K. **Complete and incomplete PMU observability for hybrid state estimation**. In: 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC). IEEE, 2017. p. 867-870.

JAMES, Jerin; BINDU, S. **Hybrid state estimation including PMU measurements**. In: 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC). IEEE, 2015. p. 309-313.

LUNARTI, Lucas Luiz; GOUVÊA, Maury Meirelles. **Optimal Allocation of PMU and PDC in Electrical Power Systems**. In: 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA). IEEE. p. 1-6.

MANDICH, Mirka; XIA, Tianwei; SUN, Kai. **Optimal PMU placement using stochastic methods**. In: 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2019. p. 1-5.

YANG, Congrui et al. **An improved adaptive genetic algorithm for function optimization**. In: 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2016. p. 675-680.

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

Data de aceite: 01/06/2021

Vinicius Pedroza Delsin

<http://lattes.cnpq.br/6827641444982722>

Antonio Newton Licciardi Junior

<http://lattes.cnpq.br/2276618624922896>

<https://orcid.org/0000-0002-6755-883X>

RESUMO: A globalização e os avanços nas áreas de tecnologia e ciência naturalmente geram um aumento no consumo de energia elétrica. O consumo de energia tem estado constantemente na pauta de sustentabilidade da ONU. Diante disso, a utilização de energias renováveis e de baixo impacto ambiental deixou de ser uma opção e passou a ser uma necessidade. O Brasil é um país que possui ótima localização geográfica do ponto de vista de insolação. As placas fotovoltaicas veem suprindo esse crescente aumento na demanda por energia solar sustentável, porém a eficiência de conversão energética delas ainda é um ponto de atenção, que instiga pesquisas e estudos. Esse trabalho tem como objetivo detalhar e comprovar as principais técnicas e maneiras utilizadas para melhorar a eficiência energética de placas solares. Particularmente é dado foco a geração fotovoltaica assistida por um seguidor (*tracker*). E, também, com acoplamento de sistema de arrefecimento e ainda refletores para aumentar a luminosidade sobre os painéis. Além disso, visa evidenciar eventuais vantagens e desvantagens de um protótipo, utilizando algumas técnicas de otimização energética em conjunto, com intenção

de obter uma melhor relação entre custo e geração de energia de um sistema fotovoltaico. Conseqüentemente, verificar a melhoria do tempo de retorno de investimento e apontar as complementações necessárias.

PALAVRAS-CHAVE: Placa Fotovoltaica. Eficiência Energética. Otimização.

ABSTRACT: Globalization and advances in technology and science naturally generate an increase in electricity consumption. Energy consumption has been constantly on the ONU scheduler for sustainability. Therefore, the use of renewable energies with low environmental impact is no longer an option and has become a necessity. Brazil is a country that has an excellent geographical location for solar cells. Photovoltaic plates are supplying this growing increase in the demand for sustainable solar energy, but their energy conversion efficiency is still a point of attention, which instigates research and studies. This work aims to find and prove the main techniques and ways used to improve the energy efficiency of solar panels. Particular focus is given to photovoltaic generation assisted by a follower (*tracker*). And, also, with cooling system coupling and reflectors to increase the luminosity on the panels. In addition, it aims to show the advantages and disadvantages of a prototype, using some optimization techniques together, with the intention of obtaining a better relationship between the cost and the energy generation of a photovoltaic system. Consequently, verify an improvement in the return on investment time and point out as necessary complementations.

KEYWORDS: Photovoltaic Panels. Energy

INTRODUÇÃO

A atual matriz elétrica brasileira é composta principalmente por usinas hidroelétricas e térmicas, segundo o ministério de minas e energia, 64% da energia elétrica produzida no Brasil vem de usinas hidrelétricas (GOVB, 2020). Apesar de serem consideradas limpas e renováveis, as usinas hidrelétricas causam um grande impacto social e ambiental na região, devido a realocação de populações ribeirinhas, alagamento de grandes áreas e processo de degradação anaeróbica das áreas alagadas gerando gases do efeito estufa. Além disso, grande parte dos rios de alta capacidade de geração já vem sendo utilizados no Brasil (ARAÚJO et al. 2016, p20).

As placas fotovoltaicas são uma solução para geração de energia limpa e renovável (FIEP,2018), as placas possuem flexibilidade de instalação, mínima necessidade de manutenção e uma boa relação energia gerado por metro quadrado, esses são alguns dos fatores que vem acarretando nesse crescente aumento da geração de energia solar nos últimos anos (KRUANGAM et al. 2006).

O Brasil tem destaque para instalação de placas solares devido ao seu posicionamento estratégico, o projeto de sistemas fotovoltaicos normalmente exigem uma radiação de no mínimo 3 ou 4 kWh/(m² .dia) (PINHO, 2014). Na Figura 1 é possível observar o potencial disponível para o Brasil comparado com países da Europa, vários dos quais já utilizam largamente a geração de energia elétrica por placa solar como a Alemanha e a Espanha (PINHO, 2014).

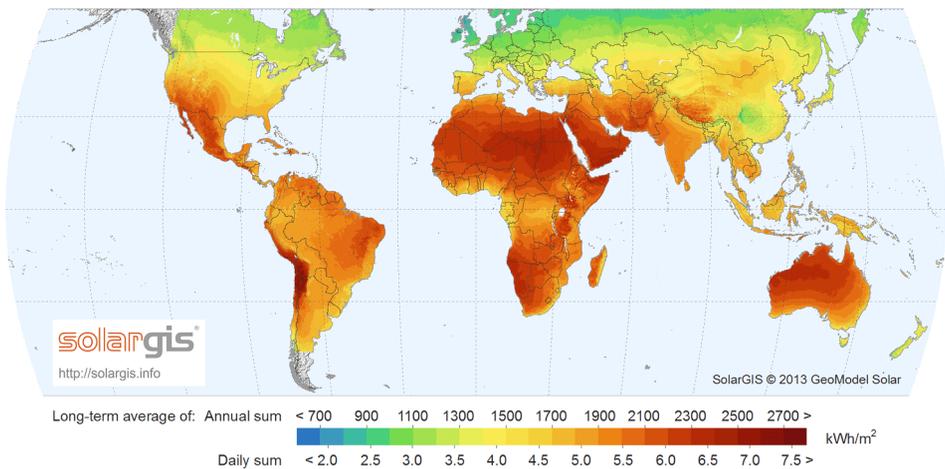


Figura 1 - Mapa de irradiação no mundo

Fonte: (Solargis, 2013).

Segundo a Empresa de pesquisa Energética as placas fotovoltaicas já representavam em 2018 uma fatia de 65% da geração de energia distribuída pelo Brasil. Entretanto, mesmo com o crescente aumento na geração de energia solar, a porcentagem referente a geração de energia estava em 0,5% do total de energia gerada no Brasil (ENERGÉTICA, 2019), demonstrando assim o grande potencial de crescimento desse setor.

As principais dificuldades enfrentadas para uma expansão na utilização de sistemas fotovoltaicos em residências, indústrias e comércios são o alto investimento inicial na aquisição e instalação das placas solares e o tempo de retorno de investimento (ROI) das placas. No Brasil, o tempo de ROI pode variar bastante, devido aos diferentes climas presentes nas regiões e dos valores cobrados em cada local, por isso, é importante que cada caso seja estudado individualmente, entretanto, segundo uma projeção realizada pela ANEEL em 2017, o tempo de retorno médio no país é de 6,6 anos.

Um dos fatores que aumentam esse tempo de retorno do investimento é a eficiência de conversão das células solares, essa medida é dada pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as células comerciais apresentam um índice de eficiência entre 15% e 19% (DOS PASSOS, 2017, p23).

Com o propósito de melhorar a eficácia deste processo de geração, várias técnicas de otimização foram desenvolvidas, algumas simples como a instalação da placa com as inclinações corretas para otimizar a incidência solar diária, outras mais elaboradas como seguidores solares, técnicas de arrefecimento e uso de refletores.

REFERENCIAL TEÓRICO

Eficiência energética é a medida da proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica, segundo a ANEEL a eficiência energética de uma placa fotovoltaica convencional gira em torno de 14% a 25%.

O INMETRO (Instituto Nacional de Meteorologia Qualidade e Tecnologia) estabelece os requisitos e ensaios pelos quais os módulos fotovoltaicos devem ser submetidos para receber a homologação e o respectivo selo de conformidade que pode ser observado na Figura 2, permitindo assim a utilizaçãoem do módulo em sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica (SILVA et al. 2014).

Após a realização dos ensaios em laboratório, é realizada uma classificação de “A” até “E”, sendo “A” a melhor categoria para eficiência energética e “E” a pior (PINHO et al. 2014).

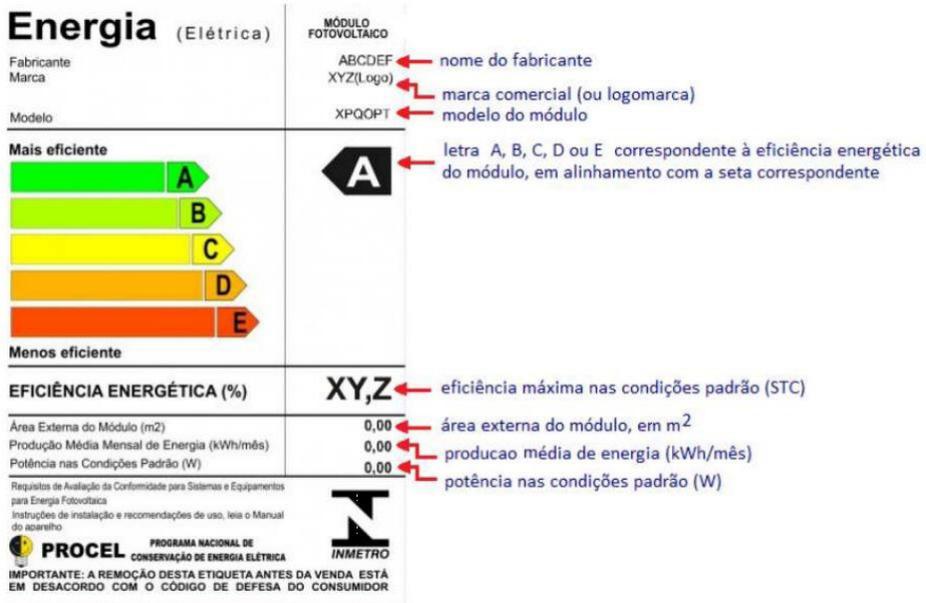


Figura 2 contém um exemplo da etiqueta padrão utilizada.

Fonte: (SILVA, 2014)

O *Tracker* ou seguidor solar é um equipamento que é acoplado ao suporte da placa fotovoltaica, permitindo que ela rotacione em volta do próprio eixo, a rotação pode ter um ou dois eixos de liberdade (DA SILVA LEMOS, 2020).

Essa liberdade de rotação permite que a placa acompanhe a direção com maior irradiação solar, assim aumentando seu tempo de exposição e gerando mais energia (BLASZCZAK, 2017). Em teste realizados pelo o pelo Departamento de Mecânica e Engenharia da Universidade de Bhubaneswar na Índia, um *tracker* com um eixo de liberdade demonstrou um desempenho superior em todos os horários e em todas as condições climáticas, produzindo em média um aumento de 22% na eficiência dos painéis fotovoltaicos fixos, tendo uma melhora mais significativa em dias nublados e em horários com menos intensidade de raios luminosos (JENA et al. 2015). Na Figura 3 é possível observar um esquema de um *tracker* com um grau de liberdade.

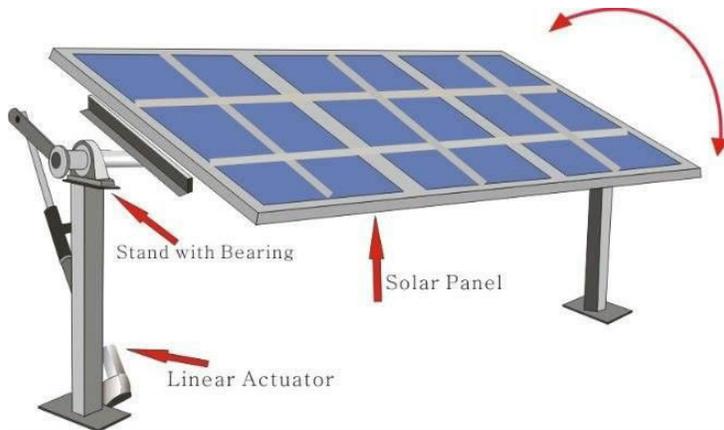


Figura 3 - Exemplo de *Tracker* com 1 eixo de rotação.

Fonte: (DA SILVA LEMOS, 2020)

Em um estudo realizado pela Universidade de São Paulo escola de engenharia de São Carlos, demonstrou que um seguidor solar, com dois eixos de rotação apresenta um aumento de 18% de eficiência em relação ao um seguidor de apenas um eixo de rotação e um aumento de 39% em relação a uma placa fixa. Esse mesmo estudo também apresenta um aumento de 25% de eficiência entre uma placa com um seguidor solar com dois eixos de liberdade e uma placa fixa posicionada de forma otimizada em relação a sua localização geográfica (TREVELIN, 2014).

O equipamento seja de 1 ou 2 eixos de liberdade pode ter seu movimento pré-estabelecido, assim fazendo todos os dias as mesmas posições nos mesmos horários, ou ele pode funcionar de maneira inteligente, valendo-se do uso de sensores e microcontroladores de baixo custo e alto desempenho, para assim decidir a melhor posição para cada momento do dia (CORTEZ et al. 2013).

O arrefecimento da placa fotovoltaica é possivelmente o mais eficiente e menos explorado das técnicas de otimização conhecidas, o aumento da temperatura do painel solar compromete sua capacidade de gerar energia (JURANIC, 2020).

A potência do gerador Fotovoltaico cai entre 0,3 e 0,4% a cada aumento de 1°C. Os painéis fotovoltaicos normalmente não operam em locais com condições ideais para seu funcionamento, no caso da temperatura os ensaios laboratoriais são realizados a 25 graus Celsius, tendo na maioria das aplicações a temperatura do painel muito superior, acarretando assim em uma perda na sua potência (ALMEIDA, 2012).

Segundo Vinícius Oliveira da Silva, mestrando em sistemas de potência pela USP, que desenvolveu um Protótipo de equipamento resfriador de painéis fotovoltaicos, após a temperatura de um painel solar atingir 45 graus Celsius, há uma perda de 0,5% da eficiência na geração de energia a cada grau de aumento (DA SILVA, 2016).

De acordo com uma pesquisa realizada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, por Gustavo Marques Mattos, o aumento da temperatura na placa diminui os seus valores de tensão e conseqüentemente, sua potência. Já a corrente elétrica não apresenta variação relevante com o aumento da temperatura. Portanto, o que faz a potência da placa fotovoltaica diminuir com o aumento da temperatura é exclusivamente a queda em seus valores de tensão (MATTOS, 2016).

Até o momento, a principal forma de se reduzir a temperatura de uma placa fotovoltaica foi a instalação da placa sobre a água, local em que a temperatura tende a ser mais baixa que no solo (NASCIMENTO, 2020). A Figura 4 contém uma fotografia de instalação de painéis solares sobre a água, com o objetivo de arrefecimento.



Figura 4 - Exemplo de instalação de placas fotovoltaicas sobre a água.

Fonte: (DOS REIS, 2020).

Em virtude da tentativa de aumentar o aproveitamento da radiação solar, alguns sistemas fotovoltaicos recorrem refletores para redirecionar raios que não seriam capturados pelas placas, possibilitando assim uma maior quantidade de irradiação diária. O desenvolvimento de um sistema mecânico que acopla espelhos junto as placas fotovoltaicas pode gerar um aumento de 7% na sua eficiência (CORNELIUS, 2017). A Figura 5 contém fotografia e dados de eficiência de placa solar usada com e sem espelho.

Tabela 1 - Características de teste		
Painel Solar	Sem espelho	Com espelho
V_{oc} (V)	29,1	29,4
I_{sc} (A)	2,63	3,4

Tabela 2 - Resultados com carga		
Painel Solar	Sem espelho	Com espelho
Tensão (V)	12	12
Corrente (A)	1,71	1,84
Potência (W)	20,52	22,08
Eficiência (%)	7,57	8,15



Figura 5 - Comparação entre placa fixa e placa com acoplamento de espelho.

Fonte: (CORNELIUS, 2017).

METODOLOGIA

Com o objetivo de se detalhar e confirmar os dados obtidos no referencial teórico, foram realizados ensaios de campo com algumas das técnicas e equipamentos citados. Na realização dos ensaios foram auferidas medições simultâneas em duas placas fotovoltaicas de mesmo fabricante e características. Os dados técnicos das placas podem ser examinados na fotografia do selo INMETRO da Figura 6 e os dados da Tabela 2.

Komaes Solar

Model No.: KM(P) 10
 Peak Power (Pmax): 10W
 Maximum Power Current (Imp): 0.60A
 Maximum Power Voltage (Vmp): 17.56V
 Short-Circuit Current (Isc): 0.66A
 Open-Circuit Voltage (Voc): 21.52V
 Power Tolerance: ± 5 %
 Application Class: DC 12V
 Weight: 1.04kg
 Dimension (mm): 370x250x18mm
 Maximum System Voltage: 750 V

All technical data at standard test condition
 AM=1.5 E=1000W/m² Tc=25°C

WARNING ELECTRICAL HAZARD
 THIS UNIT PRODUCES DC ELECTRICITY WHEN EXPOSED TO LIGHT. COVER GLASS BEFORE REMOVING TERMINAL JUNCTION BOX LID.

NINGBO KOMAES SOLAR TECHNOLOGY CO.,LTD
 www.komaes-solar.com

Energia (Elétrica)

Fabricante: S3 SOLAR KOMAES
 Modelo: KM(P)10

Mais eficiente: A, B, C, D
 Menos eficiente: E

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%) **10,8**

Área Externa do Módulo (m²): 0,09
 Produção Média Mensal de Energia (kWh/mês): 1,23
 Potência nas Condições Padrão (W): 10,08

PROCEL

Figura 6 - Dados de Referência da Placa Solar

Fonte: os autores

Característica	Valor
Potência Máxima (Pmax)	10 W
Tensão Máxima Potência (Vmp)	17,56 V
Tensão Circuito Aberto (Voc)	21,52 V
Corrente Máxima Potência (Imp)	0,60 A
Corrente de Curto Circuito (Isc)	0,66 A
Temperatura Referência (T0)	25 °C
Medidas	370x250x18mm
Peso	1040 g

Tabela 2 – Dados Relevantes da Placa Solar

Fonte: os autores

Para a confirmação de eficiência do acoplamento de espelhos nas placas solares, foram instaladas duas placas paralelas ao solo, em uma das placas foi colocado um espelho de 350mm x 250mm perpendicularmente ao solo. Foram realizadas medições simultâneas dos valores de tensão e corrente de ambas as placas das 10 horas até as 17 horas e 30 minutos durante vários dias. O ensaio foi realizado em dias ensolarados na cidade de Santos. Os valores de tensão e corrente médios coletados nas medições são apresentados na Tabela 3.

Horário	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Sem Refletor	18,24V 0,17A	19,37V 0,18A	19,34V 0,18A	19,61V 0,18A	19,45V 0,18A	18,94V 0,17A	18,12V 0,16A	17,23V 0,16A
Com Refletor	18,39V 0,18A	19,36V 0,19A	19,39V 0,19A	19,73V 0,19A	19,59V 0,19A	18,93V 0,18A	18,25V 0,17A	17,26V 0,17A
Horário	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Sem Refletor	16,43V 0,14A	14,34V 0,13A	10,78V 0,09A	8,89V 0,08A	7,21V 0,06A	3,92V 0,02A	3,12V 0,02A	1,57V 0,01A
Com Refletor	16,47V 0,15A	14,46V 0,14A	10,83V 0,10A	9,97V 0,08A	7,23V 0,07A	3,87V 0,03A	3,40V 0,02A	1,75V 0,01A

Tabela 3 - Dados de Tensão e Corrente coletados

Fonte: os autores

Para a confirmação de eficiência do arrefecimento das placas solares, foi instalado duas placas paralelas ao solo, uma das placas foi instalada sobre uma superfície de água disponível em um recipiente de pequena espessura, aproximadamente 15 cm, e de tamanho próximo ao da placa utilizada. Foram realizadas medições simultâneas dos valores de tensão e corrente de ambas as placas das 10 horas até as 17 horas e 30 minutos, o ensaio foi realizado durante alguns dias ensolarados na cidade de Santos. Os valores de tensão e

corrente médios coletados nas medições são apresentados na Tabela 4.

Horário	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Solo	17,73V 0,16 ^a	17,56V 0,16A	18,87V 0,17A	19,23V 0,17A	19,52V 0,18A	19,31V 0,18A	18,23V 0,17A	17,07V 0,16A
Água	18,58V 0,17 ^a	18,39V 0,17A	19,79 0,18	20,16V 0,18A	20,34V 0,19A	20,26V 0,18A	19,08V 0,17A	18,01V 0,17A
Horário	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Solo	16,12V 0,15 ^a	15,67V 0,14A	12,85V 0,12A	7,63V 0,07A	5,37V 0,05A	4,17V 0,04A	3,23V 0,03A	2,15V 0,02A
Água	16,87V 0,16 ^a	16,27V 0,15A	13,46V 0,12A	7,96V 0,07A	5,48V 0,05A	4,20V 0,04A	3,22V 0,03A	2,16V 0,02A

Tabela 4 - Dados de Tensão e Corrente coletados com arrefecimento

Fonte: os autores

Para os cálculos de potência elétrica média gerada, são utilizados os valores de tensão e corrente para cada um dos horários de medição, de acordo com a Equação 1 apresentada abaixo. Tal cálculo é aplicado para os valores medidos apresentados nas Tabelas 3 e 4. Finalmente os valores de eficiência são calculados. Para tal nas potências médias da Tabela 3, utiliza-se a Equação 2, em que a potência média 2 é o valor de referência, ou seja, sem a utilização de refletor (espelho). De forma análoga é realizado o cálculo de eficiência da técnica de arrefecimento com água, tomando-se por base, ou a potência média 2, a gerada pela placa sobre o solo. Finalmente, os resultados obtidos são então apresentados na Tabela 5.

$$\text{Potência média} = (V1.I1 + V2.I2 + \dots + Vn.In) / n \quad (1)$$

$$\text{Eficiência (\%)} = [(Pot. Média 1 - Pot. Média 2) / (Pot. Média 2)].100 \quad (2)$$

	Sem Refletor	Com Refletor	Eficiência
Potência Média e Eficiência baseada na Média	2,03 W	2,16 W	6,70%
Horário de Maior Eficiência Instantânea (16h30)	78,4 mW	96,8 mW	23,40%
Horário de Menor Eficiência Instantânea (10h30)	3,49 W	3,69 W	5,82%

	Placa no SOLO	Placa na AGUA	Eficiência
Potência Média e Eficiência baseada na Média	1,47 W	1,59 W	8,41%
Horário de Maior Eficiência Instantânea (10h)	28 mW	31,6 mW	14,11%
Horário de Menor Eficiência Instantânea (17h30)	43 mW	43,2 mW	0,46%

Tabela 5 - Valores de Potência Média, Eficiência Média e Instantânea (e horário)

Fonte: os autores

Com o propósito de se comparar a relação entre cada equipamento ou método foi considerado uma placa fotovoltaica padrão para instalação em residências, sendo selecionado uma placa de 395W tipicamente usada com capacidade de geração média de 1,2kWh/dia, as características da placa podem ser observadas na Tabela 6 (NEOSOLAR, 2020).

Característica	Valor
Potência Máxima (Pmax)	395 W
Tensão Máxima Potência (Vmp)	40,2 V
Tensão Circuito Aberto (Voc)	49,1 V
Corrente Máxima Potência (Imp)	9,83 A
Corrente de Curto Circuito (Isc)	10,31 A
Temperatura Referência (T0)	25 °C
Medidas	2000x992x40 mm
Peso	22500 g

Tabela 6 - Características da placa de 395W

Fonte: (NEOSOLAR, 2020)

A Tabela 7 contém a comparação da relação entre investimento inicial (custo dos sistemas), aumento de eficiência e custos adicionais de cada uma das técnicas e equipamentos apresentados no referencial teórico (*tracker*, nas duas primeiras linhas) e nos ensaios realizados (duas últimas linhas – uso de refletor e refrigeração). Não foi possível realizar os ensaios práticos com o sistema *tracker* de 1 eixo e 2, em função das limitações impostas no período de execução do corrente trabalho (COVID). Os valores dos preços de investimento inicial e custos de manutenção foram coletados da internet sendo realizado uma média entre 3 a 5 produtos de cada item. Para a tabela foi considerado apenas custos

de equipamentos e suportes, não foi incluso mão de obra para instalação de nenhum item.

	Investimento Inicial	Aumento de Eficiência	Custos Adicionais por mês
Tracker 1 eixo	R\$ 212,30	22,00%	Aprox 0,15% da geração
Tracker 2 eixos	R\$ 441,15	39,00%	Aprox 0,2% da geração
Refletor	R\$ 70,00	6,70%	R\$ 0,00
Arrefecimento	R\$ 200,00	8,41%	R\$ 0,00

Tabela 7 - Investimento necessário e melhora na eficiência de geração

Fonte: os autores

Para a proposição de valores apresentados na Tabela 8:

- Considerou-se a placa comercial típica de 395W. O custo médio adotado para a placa é de R\$1052,55, de acordo com NEOSOLAR (2020), e seu suporte de instalação em R\$220,71.
- Para cálculos de consumo e custo de geração, considerou-se o valor do kWh de R\$0,653 que é o valor da tarifa branca intermediária da Enel SP, distribuidora da cidade de São Paulo. (ANEEL, 2020)
- Para os cálculos, adotou-se a eficiência apresentada na Tabela 7 para os diversos métodos. Sabe-se que, para as mesmas referências de padrão de instalação, as eficiências obtidas para placas de mesmo material são as mesmas (DOS SANTOS GONÇALVES, 2020).
- Na coluna de investimento inicial foi realizada a soma do investimento inicial do equipamento mais o custo da placa fixa.
- Por fim, sabendo da Tabela 6 que a sua capacidade de geração estática (última linha da Tabela) é de 1,2 kWh/dia (placa fixa), realizaram-se os cálculos, respeitando os requisitos comentados.
- Para as comparações na próxima Seção, utiliza-se então o valor e características de geração da placa fixa (instalação padrão) como a referência para entender o suporte que os demais métodos de otimização de geração apresentados impactam no retorno do investimento final.

	Investimento Inicial	Geração de energia	Tempo de Retorno
<i>Tracker 1 eixo</i>	R\$ 1.485,56	43,87 kWh/mês	51,86 meses
<i>Tracker 2 eixos</i>	R\$ 1.714,41	49,97 kWh/mês	52,54 meses
Refletor	R\$ 1.343,26	38,41 kWh/mês	53,56 meses
Arrefecimento	R\$ 1.473,26	39,03 kWh/mês	57,80 meses
Placa Fixa	R\$ 1.273,26	36,00 kWh/mês	56,14 meses

Tabela 8 – Investimentos necessários, geração média mensal e tempo de retorno estimado.

Fonte: os autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os dados apresentados na Tabela 8 é possível verificar que o acoplamento de espelhos e o uso do *Tracker* com 1 eixo de rotação auxiliam a diminuir o prazo para obter o do retorno de investimento da instalação. Sendo assim, a construção de um protótipo ideal, deve utilizar essas duas técnicas em conjunto. Na Tabela 9 é então apresentada a comparação entre o ROI de uma placa fixa e o ROI estimado da junção entre o acoplamento de espelhos e o *Tracker* com 1 eixo de rotação, baseado nas informações da Tabela 7. O protótipo então apresentaria uma diminuição de 6 meses no retorno de investimento em relação a instalação de uma placa fotovoltaica fixa.

	Investimento Inicial	Geração de energia	ROI
Protótipo	R\$ 1555,56	46,86 kWh/mês	4 anos e 3 meses
Placa Fixa	R\$ 1273,26	36 kWh/mês	4 anos e 9 meses

Tabela 9 - Relação entre o protótipo idealizado e uma placa solar fixa.

Fonte: os autores

É possível verificar que o acoplamento de espelhos obteve os melhores resultados em horários de menores incidência de raios solares 16h30, por outro lado, a técnica de arrefecimento obteve os melhores resultados em horários de alta incidência solar 10h, horários onde a temperatura tende a ser mais alta.

Vale comentar que o investimento inicial para se realizar a instalação de um sistema solar e sua manutenção constituem obstáculos para que o uso da energia solar seja difundido mais rapidamente. Este custo naturalmente depende de materiais e mão de obra especializada. Quanto mais empresas especializadas em um cenário competitivo como este estiverem atuando, a tendência é que tais custos sejam mais agressivos, reduzindo o ROI estimado como sumário na Tabela 9.

Outro fator que precisa ser levado em consideração é o preço do kWh da região. Para as discussões do corrente trabalho, foi considerado um kWh de R\$0,653 (ANEEL, 2020). Sabe-se que em algumas regiões e dependendo da época do ano esse valor pode ser consideravelmente maior (ANEEL, 2020). E, desta forma, quanto maior for o preço do kWh mais atrativo se tornam esses equipamentos e técnicas que melhoram a geração da placa.

Para a instalação com arrefecimento, cujo ROI não foi interessante, cabem alguns comentários. Para o protótipo, simplesmente considerou-se um recipiente de tamanho próximo aos das dimensões da placa e com espessura determinada. Porém, neste caso, não existe a circulação de água, que poderia melhorar ainda mais a refrigeração da placa e seu conseqüente desempenho. Cabe ressaltar que o arrefecimento de placas fotovoltaicas pode ter um preço consideravelmente variável, dependendo da técnica e local

a ser trabalhado. Isto ocorre com o exemplo mencionado na Figura 4, que poderia ter a infraestrutura inicial de suportes de instalação um pouco mais cara, porém alavancar a capacidade de geração do sistema, pela livre circulação e água. Vale dizer então, que este é um processo que pode ainda ser amadurecido e padronizado em padrões construtivos pelas empresas do setor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No corrente trabalho foram estudados e evidenciados os diversos métodos preconizados para aumentar a eficiência de geração de energia de placas fotovoltaicas. Foram estudados, ensaiados e analisados em particular: a utilização de espelhos refletores acoplados, direcionamento de placas através de mecanismos com um ou dois graus de liberdade (*trackers*), arrefecimento do dispositivo com água. Para cada método sugerido, elaborou-se um protótipo ou modelo fotovoltaico de referência e foram comparados os resultados de geração com outro, em que cada método foi aplicado. Os resultados de geração foram apresentados e discutidos. Em sequência, procedeu-se a extrapolação dos resultados considerando placas fotovoltaicas tipicamente instaladas comercialmente. Os custos foram levantados e dadas a diferenças na geração, os melhores métodos foram identificados. Pelos resultados obtidos, chega-se a conclusão que o uso de *tracker* com 1 grau de liberdade e espelhos devem ser usados para otimizar a geração e conseqüentemente reduzir o ROI do projeto. Nas condições ponderadas, o ROI da instalação fotovoltaica foi melhorado em 6 meses. Por outro lado, o uso de arrefecimento nas condições prototipadas não se mostrou eficiente.

Para trabalhos futuros, seria interessante o estudo de outras formas de arrefecimento de placa, como alguma forma alternativa de diminuir a temperatura da placa em lugar sem acesso a água em abundância. Sugere-se a utilização de algum tipo de gel de arrefecimento ou o uso de sistemas com fluxo de ar para retirar calor da placa. Outro aspecto que poderia ser abordado são as formas alternativas para o controle dos sistemas de seguidor solar, utilização de microcontroladores de baixo custo, a fim de reduzir os valores de investimentos inicial desse equipamento.

APOIO

PIVIC Mackenzie.

REFERÊNCIAS

ANEEL, **Relatório de Tarifas 2020**. Acessado em 18 de setembro de 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorio-ranking-tarifas>>

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes de; RANK, Narah luata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BLASZCZAK, Vinícius. **Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar**. Universidade Federal da Fronteira Sul. 2017.

CORNELIUS, Richard Gonçalves; BENDER, Vitor Cristiano; MAIA, Amanda Costa. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA REFLEXÃO DE ESPELHOS. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 8, n. 2, 2017.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro et al. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto. 2013.

DA SILVA, Vinícius Oliveira et al. **Análise técnica para concepção/projeto de usina solar fotovoltaica arrefecida em UHE**. Universidade de São Paulo, 2016.

DA SILVA LEMOS, Luã; RAMOS, Maiane. Aplicação do Sistema Tracker em estruturas de Rastreo Solar. **Boletim do Gerenciamento**, v. 16, n. 16, p. 60-74, 2020.

DOS PASSOS, David et al. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PLACAS FOTOVOLTAICAS (PROJETO SEGUE O SOL). **Maiêutica-Engenharias**, v. 3, n. 01, 2017.

DOS REIS, João Rodrigo Leitão; FARIA, Ivani Ferreira; FRAXE, Therezinha de Jesus Pinto. Geoconservação e Geoturismo na Amazônia. **Revista Turismo Em Análise**, v. 31, n. 1, p. 50-76, 2020.

DOS SANTOS GONÇALVES, Paulo Vitor et al. O NEXUS ENERGIA-ÁGUA NA ECONOMIA CIRCULAR URBANA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE BELÉM, PARÁ, BRASIL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 308-326, 2020.

ENERGÉTICA, EPE EMPRESA DE PESQUISA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Relatório síntese, ano base 2018. **Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia**, 2019.

FIEP, Federação das Indústrias do Estado do Paraná, **Como está e até onde pode ir a energia limpa no Brasil**, 2018.

GOVB, Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira, **Governo do Brasil**, 21 de jan. 2020. Disponível em: <[JENA, S.P. Jena, S.K. Acharya, C. Deheri. **Performance Analysis of a SelfActivating Solar Tracking Setup**, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology \(IJRASET\), 2015.](https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira#:~:text=Fontes%20de%20energia%20renov%C3%A1veis%20representam%2083%25%20da%20matriz%20el%C3%A9trica%20brasileira,-No%20Brasil%2C%20as&text=O%20Brasil%2C%20atualmente%2C%20tem%2083,Minas%20e%20Energia%2C%20Reive%20Barros.></p></div><div data-bbox=)

JURINIC, Francesco. Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento. 2020.

KRUANGAM, Dusit et al. Growth of Photovoltaic Industry and Market in Thailand, A Case Study of Solartron PCL. In: **2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference**. IEEE, 2006.

MATTOS, Gustavo Marques. Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ**, 2016.

NASCIMENTO, Francisleile Lima. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ENERGIA ALTERNATIVA E SUSTENTÁVEL PARA O ESTADO DE RORAIMA-RR. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 1, n. 3, p. 25-34, 2020.

NEOSOLAR. **Painéis Solares**. Disponível em: https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-395w-ulica-ul-395m-144.html?gclid=Cj0KCCQjw-uH6BRDQARIsAI3l-UdoU3X-tsJIYLWfLKGBpQwYt7rsP-Li1y0ttVsMANSPPp8ZI7Wuo-XAaAtY7EALw_wcB. Acessado em 19/set./2020.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2014.

SILVA, **Estudo de perdas em sistemas fotovoltaicos**, Pedro Henrique Tronco Silva, Fabiana Florian, Fernando Augusto Baptistini Pestana, Universidade de Araraquara, 2014.

TREVELIN, Felipe Camargo; GESUALDO, E. Estudo Comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. **Monografia (Graduação)–Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos**, 2014.

SÍNTESE DE UM CONTROLADOR MPC PARA O CONDICIONAMENTO DE AR DO EDIFÍCIO MODERNO

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

Míriam Tvrzská de Gouvêa

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia de Produção
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/0090676182871757>

Catarina Gomes dos Santos

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia de Produção
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/2138760568721880>

Alessandro Ferreira da Silva

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia Mecânica
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4333159781813651>

José Pucci Caly

Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Engenharia Mecânica
São Paulo – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/2227125062476125>

Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Centro
de Ciência e Tecnologia
Campinas – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/7895015248377288>

Edifício Moderno, pela manipulação da abertura da válvula de expansão eletrônica e rotação do *chiller* e das frações de *bypass* de água fria para os *fancoils* que fornecem água gelada para as zonas. O controlador preditivo foi modelado como um problema da programação não linear sujeito a restrições, dentre as quais se incluem as faixas de operação da rotação do compressor e da temperatura da água que sai do evaporador. Para avaliar a operação do controlador proposto, considerou-se a sua capacidade de implementar alterações no *setpoint* das temperaturas das zonas e de rejeitar perturbações na edificação devidas a variações na ocupação e ambientais. O desempenho do controlador preditivo proposto foi comparado ao de um controlador tradicional do tipo PID sintonizado pela técnica de controle por modelo interno (IMC). Mostra-se, no trabalho, que o uso da tecnologia de controle avançado é viável para este tipo de sistema e permite controlar a operação em condições fora do projeto (*off-design*), diferentemente do que ocorre com o controlador PID. Contudo, o procedimento de sintonia do controlador preditivo não é trivial e alguns cenários simulados mostram a necessidade de uma melhoria na sintonia. Este estudo foi realizado por simulações da planta virtual do Edifício Moderno no ambiente de programação do simulador MATLAB® R2006b.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Preditivo. Ar condicionado. PID-IMC.

RESUMO: Este trabalho apresenta a síntese de um controlador preditivo para controlar a temperatura de operação de 35 zonas do

SYNTHESIS OF A MPC CONTROLLER FOR THE AIR CONDITIONING SYSTEM OF EDIFÍCIO MODERNO

ABSTRACT: This work presents the synthesis of a predictive controller that controls the operating temperatures of 35 zones of Edifício Moderno by manipulating the opening of the electronic expansion valve and the rotation of the compressor of the chiller and the water bypass fraction to each fancoil used to control the air temperature of each zone. The predictive controller was modeled as a nonlinear programming problem subjected to constraints, including operational bounds on the rotation of the compressor and bounds on the temperature of the cold water from the evaporator. In order to evaluate the operation of the controller, the setpoint tracking capability of the controller was analyzed as well as its capacity to reject disturbances due to variations in thermal occupancy load and ambient external conditions. The performance of the proposed controller was compared with a traditional PID controller tuned by the IMC technique. It is shown that the usage of the proposed advanced control technology is viable for this kind of system and enables controlling off-design conditions, differently from what happens with the PID controller. However, the tuning procedure of the predictive controller is not trivial and some scenarios show the necessity of improving the tuning. For this study, simulations of the virtual plant of Edifício Moderno were performed using MATLAB® R2006b.

KEYWORDS: Model Predictive Control. Air conditioning. PID-IMC.

1 | INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente está tornando cada vez mais relevante a redução do consumo de energia elétrica nos sistemas de climatização em edifícios. Considera-se que quase 50% da demanda de energia em edificações comerciais servem para suportar condições de conforto térmico interno e, em países desenvolvidos, sistemas de climatização consomem de 10% a 20% da energia total do país (ALI, 2013). No Brasil, em 2017, o consumo de energia elétrica alcançou o patamar de 528 TWh, sendo o consumo estimado de energia correspondente aos condicionadores de ar em residências de 18,7 TWh e estima-se que em 2035 irá para 48,5 TWh, um crescimento de 5,4% ao ano (EPE, 2018). Estes dados evidenciam que é preciso aderir às políticas de eficiência energética com estratégias de controle de processo apropriadas.

Para Caiado (2016) os principais desafios da eficiência energética são: a falta de prioridade para esse aspecto nas empresas; gestores incapazes de entender os benefícios da eficiência energética tanto no contexto de economia de riqueza quanto no ganho social; e a dificuldade em conscientizar indivíduos que nunca tiveram contato com esse tipo de política.

Para sistemas de ar condicionado já existentes, a melhoria da eficiência energética pode ser alcançada pela implementação de estratégias de controle avançado e/ou de otimização que permite a redução do consumo de energia, a detecção de erros e a realização de diagnósticos (ZHAO & YU, 2017). O emprego de técnicas de controle avançado no setor de ar condicionado é, no entanto, ainda incipiente (KILLIAN & KOZEK,

2016; ZHAO & YU, 2017).

Neste trabalho, apresenta-se um controlador preditivo baseado em modelos (MPC) sintetizado para controlar a operação de 35 zonas do Edifício Moderno, cujo desempenho foi comparado com o de um controlador PID convencional sintonizado pela técnica IMC.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

O sistema de ar condicionado do Edifício Moderno foi concebido por Araújo (2016). O Edifício Moderno é uma edificação de grande porte localizada na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. O sistema de ar condicionado atende uma área de 19193,4 m² e considerou-se no projeto do sistema de ar condicionado apenas o controle da temperatura sem levar em consideração o controle da umidade relativa, prática comum que visa à redução de custos fixos. O condicionamento do ar no Edifício Moderno é realizado por um sistema de ar condicionado central do tipo ar-água, que é um dos tipos de sistemas de ar condicionado mais eficaz que existe (ZHAO & YU, 2017). O projeto do sistema de ar condicionado do tipo ar-água foi dimensionado por Araújo (2016) por meio do software de simulação comercial *Hourly Analysis Program* (HAP) ® 5.10. O projeto contempla o uso de 3 *chillers* para fornecer água gelada para *fancoils* que fornecem ar frio a ser insuflado nas diversas zonas do edifício. Cada *chiller* tem carga nominal de 1064,4 kW.

Pellegrini *et al.* (2018) propuseram um modelo matemático para representar a operação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno, elaborando um simulador de processos no ambiente de programação do MATLAB®. Salienta-se que Pellegrini *et al.* (2018) elaboraram um modelo parcial do edifício completo que contempla a operação de um *chiller* que fornece água fria a 35 *fancoils*, sendo que cada *fancoil* fornece ar frio a uma grande zona. No modelo de Pellegrini *et al.* (2018), as zonas foram modeladas como regiões homogêneas que recebem uma vazão constante de ar frio. Ou seja, a temperatura da corrente de ar varia de modo a controlar a temperatura do ar nas zonas. Água gelada proveniente dos *chillers* é enviada para os *fancoils* onde ocorrerá o resfriamento do ar. Na entrada de cada *fancoil*, há uma válvula de três vias e por meio do controle do *bypass* de água é possível controlar a temperatura da corrente de ar das zonas que entra em cada *fancoil*.

O modelo de capacitância global proposto por Pellegrini *et al.* (2018) para a modelagem das zonas foi aprimorado, neste trabalho, como apresentado na Equação (1). A carga térmica de equipamentos, iluminação e de ocupação das pessoas foi arbitrada como sendo 40% da carga térmica total de cada zona projetada por Araújo (2016). Outros pormenores sobre o modelo matemático que representa a operação do Edifício Moderno podem ser obtidos em Pellegrini *et al.* (2018).

$$\frac{dT_{ret}}{dt} = \frac{\dot{m}_{ar}(cp_{AS} + ua \cdot cp_{va})(T_{in} - T_{ret}) + U_z A_z (BS - T_{ret}) + q_z}{m_z(cv_{AS} + ua \cdot cv_{va})} \quad (1)$$

Em que:

\dot{m}_{ar} = Vazão mássica de ar insuflado na zona (kg/s)

cp_{AS} = Calor específico a pressão constante para o ar seco (kJ/kgK)

ua = Umidade absoluta do ar insuflado (kg de água/kg de ar seco)

cp_{va} = Calor específico a pressão constante para o vapor de água (kJ/kgK)

T_{in} = Temperatura da corrente de ar insuflada (K)

T_{ret} = Temperatura da corrente de ar de retorno (K)

q_z = Carga térmica devida a equipamentos, iluminação e às pessoas (kW)

m_z = Massa de ar na zona (kg)

cv_{AS} = Calor específico a volume constante para o ar seco (kJ/kgK)

cv_{va} = Calor específico a volume constante para o vapor de água (kJ/kgK)

U_z = Coeficiente global de troca térmica entre a zona e o ambiente externo (W/(m²·K))

A_z = Área de troca térmica através das paredes da zona (m²)

BS = Temperatura de bulbo seco do ar ambiente externo (K)

Pode-se assegurar as condições ambientais em diversas zonas através da manipulação de algumas variáveis chamadas, na teoria de controle, de variáveis manipuladas, que são ajustadas pelo controlador para minimizar os erros entre as medições das variáveis controladas e o valor referencial. Essa forma de controle corresponde ao conceito de controle por retroalimentação. Controladores do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) são ainda hoje amplamente utilizados em sistemas modernos de controle de ar condicionado porque são simples, de fácil implementação e usualmente de forte robustez (ZHAO & YU, 2017). Uma forma tradicional de se equacionar controladores analógicos PID é apresentada pela Equação (2). Observa-se nesta equação, que a ação de controle (Δu) é proporcional ao erro ($e(t_a)$) avaliado num instante t_a , à integral do erro e à derivada do erro. Nesta equação, os parâmetros K_c , τ_i e τ_d são os parâmetros sintonizáveis do controlador PID, sendo, respectivamente, denominados de ganho proporcional, integral e derivativo que devem ser estabelecidos na etapa de síntese do controlador. O erro é definido como sendo a diferença entre a medida da variável que se quer controlar e o valor desejado para ela, chamado de valor de referência ou *setpoint*. A ação de controle é normalmente definida como sendo a variável manipulada menos um valor de referência, o qual pode ser, por exemplo, o valor da variável no ponto nominal de projeto.

$$\Delta u = K_c \left(e(t_a) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^{t'} e(t) dt + \tau_d \left. \frac{de}{dt} \right|_{t=\tau_d} \right) \quad (2)$$

Dentre os procedimentos de sintonia desenvolvidos para os controladores PID,

destaca-se a metodologia de síntese baseada nos Controladores de Modelo Interno (IMC) proposta por Garcia e Morari (1982). Nesse método o primeiro passo é identificar um modelo linear do processo e depois, empregando-se a metodologia de sintonia IMC obtêm-se os parâmetros do controlador. No segmento de ar condicionado, essa técnica passou a ser utilizada recentemente para controle da temperatura e da umidade em uma zona (XIAOCHEN & CHUNXUAN, 2014). O procedimento de obtenção dos parâmetros do controlador PID pela técnica IMC é bem documentado na literatura para modelos simples identificados do processo (SEBORG, 2004). Para modelos identificados de 1ª ordem, as constantes proporcional e integral do controlador são calculadas, respectivamente como $\frac{\tau}{K\lambda}$ e τ , sendo τ a constante de tempo do modelo de 1ª ordem, K o ganho do modelo e λ o parâmetro de sintonia do controlador (SEBORG, 2004). A metodologia IMC para a síntese de controladores PID consiste assim, na identificação de um modelo de ordem baixa, como um modelo de 1ª ordem. Para este, a etapa de identificação do modelo corresponde à determinação dos parâmetros K e τ . Estabelecidos estes, obtêm-se os parâmetros do controlador PID em função do parâmetro ajustável λ . Simulam-se as respostas em malha fechada, determinando-se o valor do parâmetro λ que fornece o desempenho considerado adequado.

Controladores preditivos, usualmente representados pela sigla MPC (*Model Predictive Control*) são estratégias de controle avançado que fazem uso de um modelo matemático para a predição de erros futuros entre as variáveis controladas e seus *setpoints*, os quais são minimizados pela predição de como se deve manipular o processo, tendo, usualmente, um melhor desempenho do que as estratégias convencionais de controle como os controladores PID (ZHAO & YU, 2017). Existem muitas formulações de controladores preditivos. As diferenças residem tanto na proposta da função objetivo que se será minimizada para o cálculo das ações de controle, como na estrutura do modelo de predição. Empregam-se, em geral, modelos lineares identificados do processo de baixa ordem. Algumas variáveis podem ser controladas por faixas, enquanto outras são controladas em *setpoints* fixos. Tanto as variáveis manipuladas, como as ações de controle e variáveis controladas ou monitoradas são sujeitas a restrições de limites. Há formulações em que o efeito de distúrbios é incorporado nas predições e também existem controladores MPC que incorporam na função objetivo do controlador, parâmetros econômicos associados, normalmente, a variáveis que medem o consumo energético no processo. O controlador MPC proposto neste trabalho é descrito no item de Metodologia.

3 | METODOLOGIA

Para a síntese dos controladores PID e MPC, procedeu-se, inicialmente, com a identificação de modelos lineares de 1ª ordem adequados, tanto à formulação do controlador MPC proposto neste trabalho, como para a aplicação do procedimento de sintonia do

controlador PID pela técnica IMC. Optou-se pela representação do modelo de 1ª ordem no domínio do tempo como apresentado na Equação (3).

$$T_i(t) = K_{i,bp} M_{i,bp} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,bp}}}\right) + K_{i,eev} M_{i,eev} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,eev}}}\right) + K_{i,rpm} M_{i,rpm} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{i,rpm}}}\right) \quad (3)$$

Em que:

$T_i(t)$ = Variável controlada num instante t menos o seu valor de referência, podendo ser a temperatura do ar de cada zona (T_z) ou a temperatura da água na saída do evaporador (T_{ag}).

$K_{i,bp}$, $K_{i,eev}$, $K_{i,rpm}$ = Ganhos do processo, sendo $i = z$ ou ag

$M_{i,bp}$, $M_{i,eev}$, $M_{i,rpm}$ = Magnitude da perturbação aplicada na variável manipulada, sendo $i = z$ ou ag

t = Instante de tempo

$\tau_{i,bp}$, $\tau_{i,eev}$, $\tau_{i,rpm}$ = Constante de tempo do modelo de 1ª ordem, sendo $i = z$ ou ag

Para a obtenção dos ganhos de processo e constantes de tempo, aplicaram-se perturbações em degrau separadamente em cada variável manipulada e a partir das respostas, os modelos foram identificados, minimizando-se a integral do erro quadrático (ISE) entre a resposta do processo e aquela predita pelo modelo de 1ª ordem.

Os ganhos e constantes de tempo identificados neste trabalho foram empregados para se obter os parâmetros do controlador PID, conforme procedimento descrito no referencial teórico. Os valores do parâmetro ajustável λ usados para a determinação dos parâmetros do controlador foram de 100 e 2000, respectivamente, para a malha de controle da água na saída do evaporador e para as malhas de controle das temperaturas de ar nas zonas.

Tanto o controlador PID, como o MPC desenvolvido neste trabalho foram incorporados ao simulador desenvolvido por Pellegrini *et al.* (2018) no ambiente de simulação do MATLAB® R2006b. Neste trabalho, empregaram-se os mesmos métodos numéricos usados por Pellegrini *et al.* (2018) para simular o modelo matemático, a saber, o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução das equações diferenciais ordinárias com passo de integração máximo de 1 segundo e o método de Programação Quadrática Sucessiva (SQP) para a resolução de sistemas de equações algébricas não lineares e para a resolução do problema de otimização do controlador preditivo.

Considerou-se para a função objetivo do controlador MPC a Equação (4), a qual foi adaptada da proposta de Wallace *et al.* (2012). A primeira parcela tem a função de minimizar o erro quadrático ponderado pelo parâmetro a_i , entre as predições da temperatura do ar das 35 zonas e seus valores de referência. A segunda parcela é para suavizar as ações, objetivando a estabilização do controlador, evitando-se mudanças bruscas no sistema e a última parcela, adaptada de Wallace *et al.* (2012) visa eliminar o *offset*, tendo assim uma

função semelhante à ação integral dos controladores PID. São, desta forma parâmetros de sintonia do controlador MPC: ρ , α_p , γ_i e δ_p , além do período de intervenção, denotado como T_s neste trabalho. Este último corresponde ao intervalo de tempo transcorrido entre as chamadas do controlador MPC.

$$\min_{\Delta u(k)} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{nc} \alpha_i (y_i(k) - y_i^{sp} + erro_{pr,i})^2 + \sum_{i=1}^{nu} \gamma_i \Delta u_i^2 + \sum_{i=1}^{nc} \delta erro_{ac,i} \quad (4)$$

Em que:

p = Horizonte de predição, corresponde ao número de instantes futuros em que as variáveis controladas são preditas (s)

nc = Número de variáveis controladas

nu = Número de variáveis manipuladas

$y_i(k)$ = Resposta da variável predita pelo modelo linear para a temperatura da zona no instante ($^{\circ}\text{C}$) conforme o modelo dado pela Equação (3)

y_i^{sp} = Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$) para a $i^{\text{ésima}}$ variável controlada

Δu_i^2 = Variação na $i^{\text{ésima}}$ variável manipulada

α , γ , δ = Parâmetros de sintonia do controlador

$erro_{pr,i}$ = erro entre o valor predito para o instante atual e o valor medido da variável calculada

$erro_{ac,i}$ = erro acumulado para cada variável controlada i . Ou seja, a cada instante em que as ações de controle são calculadas, acrescenta-se ao erro acumulado a diferença entre o valor medido da variável controlada e o seu *setpoint*.

Observando-se a Equação (4), percebe-se que para se minimizar a função objetivo, calculam-se as ações de controle. Ao problema de otimização do controlador MPC, incorporam-se também restrições, tendo sido restringidas as ações de controle e as variações nas ações de controle entre valores mínimos e máximos. Desta forma, limitações físicas não são violadas e são levadas em conta pelo controlador. As frações de *bypass* foram limitadas entre os seus limites físicos, ou seja, entre 0 e 1. A fração de abertura da EEV foi limitada entre 0,4 e 1 e a rotação foi limitada entre 40 e 60 Hz. Limitou-se o valor mínimo da EEV de modo a não propiciar uma redução do superaquecimento do fluido refrigerante na saída da evaporadora, o que poderia ocasionar a presença de líquido na entrada do compressor, comprometendo a sua integridade física. Os valores empregados para se limitar as ações de controle são documentados no item de resultados. Adicionalmente, limitaram-se os valores para a temperatura da água na saída do evaporador. Algumas razões justificam este procedimento. Diferentemente de uma prática comum de se controlar a temperatura da água em um valor fixo como feito, por exemplo, por Wallace *et al.* (2012), optou-se por deixar esta variável livre de modo que o controlador tivesse

graus de liberdade para se adaptar a diferentes condições operacionais do sistema de ar condicionado, inclusive a condições *off-design* (fora de projeto). Desta forma, para se evitar o congelamento da água ou valores de temperatura da água que ocasionariam a existência de líquido refrigerante na entrada do compressor, limitaram-se valores da temperatura da água em dois instantes de tempo k , quais sejam, no 1º instante futuro e no $p^{\text{ésimo}}$ instante futuro predito pelo controlador a partir de cada chamada do mesmo. Os limites máximos e mínimos adotados no trabalho foram 6,9°C ou 6,7°C e 5,5°C.

Após concluir a programação do controlador, efetuaram-se simulações em malha fechada para observar os resultados do controlador proposto, variando-se seus parâmetros de sintonia. As respostas dos controladores PID e MPC foram comparadas. Os resultados foram organizados na forma de gráficos, em que podem ser avaliadas as variáveis de interesse e a capacidade de controle do sistema pelos dois controladores PID e MPC.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros identificados dos modelos de 1ª ordem e as amplitudes das perturbações em degrau aplicadas ao simulador do Edifício Moderno para a obtenção dos parâmetros são apresentados na Tabela 1.

parâmetro/ índice i	z, bp	z, eev	z, rpm	a, bp	a, eev	a, rpm
K_i	-2,7928	0,3197	-0,0476	-6,4199	-0,0740	-0,1093
τ_i	539,8	569,6	543,8	186,4	4	191,6
M_i	0,018	0,1	1,5	0,018	0,1	1,5

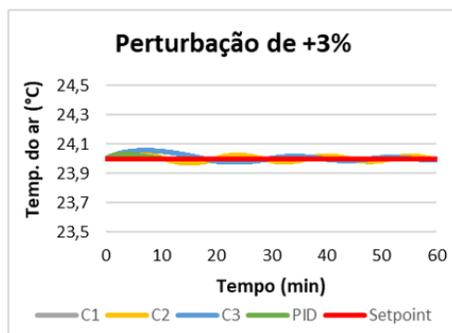
Tabela 1 – Parâmetros dos modelos de 1ª ordem identificados e amplitudes dos degraus aplicados

O período de intervenção dos controladores digitais é de 30s. As constantes proporcional e integral do controlador PID-IMC de temperatura da água na saída do evaporador são, respectivamente, 0,29035 e 37,28, enquanto que para cada malha de temperatura de ar da zona, são, respectivamente -0,8907 e 113,92. Os parâmetros de sintonia associados à função objetivo do controlador MPC empregados foram: $\alpha = 10^7$, $\gamma_{\text{bypass}} = 0$, $\gamma_{\text{EEV}} = \gamma_{\text{rotação}} = \delta = 10^3$. Ainda, para a sintonia do controlador MPC efetuaram-se várias simulações com parâmetros de sintonia diferentes. Na Tabela 2 apresentam-se três conjuntos de parâmetros de sintonia usados para avaliar o desempenho do controlador MPC.

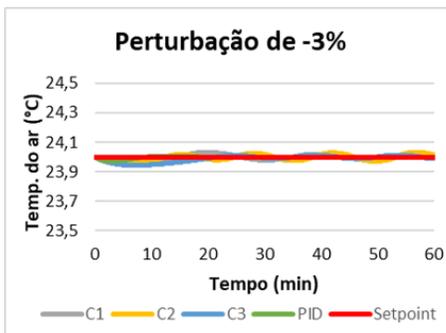
Conjunto	p	$\Delta u_{bypass_{max}}$	$\Delta u_{EEV_{max}}$	$\Delta u_{rotação_{max}}$	Tag_{min}	Tag_{max}
C1	45	0,002	0,002	0,02	5,5	6,9
C2	40	0,004	0,004	0,04	5,5	6,7
C3	15	0,002	0,002	0,02	5,5	6,7

Tabela 2 – Parâmetros para sintonia do MPC

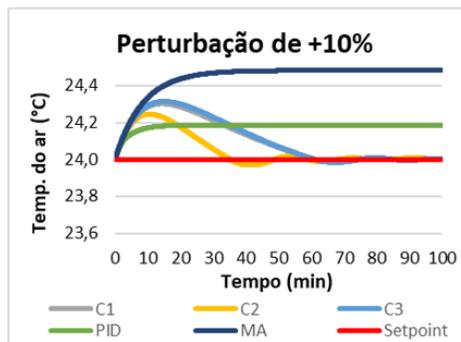
Para as simulações do comportamento do sistema em malha fechada, consideraram-se três cenários. No primeiro, foram feitas perturbações de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$ na carga térmica gerada por equipamentos, iluminação e pessoas. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas foi mantido em 24°C . No controlador PID, o *setpoint* da água do evaporador foi mantido no valor de projeto em $6,7^{\circ}\text{C}$. Os resultados da temperatura do ar nas zonas para perturbações de $\pm 3\%$ são mostrados na Figura 1 (a) e na Figura 1 (b) e as de $\pm 10\%$ na Figura 1 (c) e Figura 1 (d).



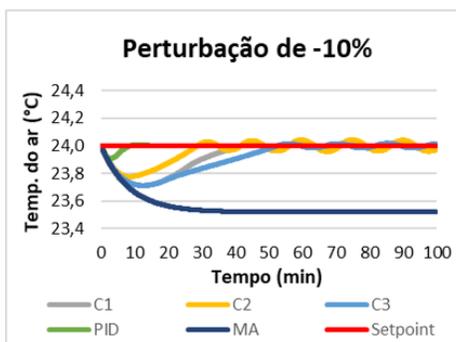
(a)



(b)



(c)



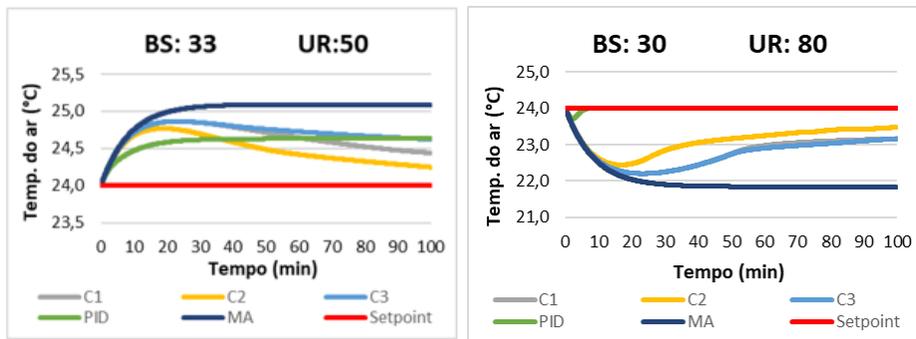
(d)

Figura 1 – Temperatura da água com perturbações devidas à ocupação nas zonas de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$

Observando-se a Figura 1, percebe-se que os controladores MPC e PID conseguem

acomodar as perturbações de $\pm 3\%$ e de -10% na carga térmica devidas à ocupação e apenas o controlador MPC consegue manter as zonas na temperatura especificada para a perturbação *off-design* de $+10\%$. Embora, observam-se oscilações nas respostas do controlador preditivo sintonizado de diferentes formas, que parecem sugerir que a operação esteja no limite de estabilidade, deve-se atentar para a pequena variação no valor da temperatura das zonas. As oscilações devem, assim, ser devidas a problemas numéricos e não a questões de estabilidade do controlador. Percebe-se que o projeto do sistema de ar condicionado foi feito a naturalmente rejeitar pequenas perturbações na ocupação. Os parâmetros de sintonia do controlador MPC apresentados visaram minimizar oscilações e assim levaram a respostas relativamente lentas, contudo a máxima amplitude de variação da temperatura ocorreu nos primeiros 20 min de operação, sendo inferior a $0,4^{\circ}\text{C}$, valor este aceitável.

No segundo cenário foi avaliado o efeito das condições ambientais no desempenho do sistema de ar condicionado. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas também foi mantido em 24°C e para o controlador PID, manteve-se o *setpoint* da água do evaporador em $6,7^{\circ}\text{C}$. Para isso foram consideradas duas situações, uma em que a temperatura de bulbo seco do ar ambiente é de 33°C com uma umidade relativa de 50% e outra em que a temperatura de bulbo seco é 30°C com a umidade relativa de 80% . Ambas as condições correspondem a dias em que a entalpia específica do ar é superior à da condição de projeto. O primeiro caso considerado é relacionado a um dia que estará mais quente e menos úmido que o dia considerado como sendo a pior situação no ano no projeto e, no segundo caso, tem-se um dia quente com uma temperatura elevada, mas inferior à do projeto e muito úmido. É um dia que causa uma sensação térmica bastante desagradável, sendo desejável o condicionamento das zonas. Os resultados da temperatura do ar na situação de 33°C com 50% de umidade é apresentado na Figura 2 (a) e na situação de 30°C e 80% de umidade na Figura 2 (b). São apresentadas, também nas figuras, as respostas em malha aberta e as respostas para os dois controladores. Para a condição de temperatura externa de 33°C e 50% de umidade relativa, o controlador PID parece estabilizar em torno de $24,6^{\circ}\text{C}$ enquanto os controladores MPC continuam diminuindo a temperatura, estabilizando-a em torno de $24,2^{\circ}\text{C}$. Na condição de 30°C e 80% de umidade relativa, o PID se mostra bem mais rápido e estabiliza em 24°C enquanto o MPC vai estabilizando com temperaturas mais baixas em torno de $23,4^{\circ}\text{C}$ após 80 minutos. A abertura da EEV e a rotação do compressor encontram-se em seus limites para este cenário, o que juntamente com a dinâmica lenta e ganhos pequenos das zonas, pode contribuir para esta queda de desempenho.

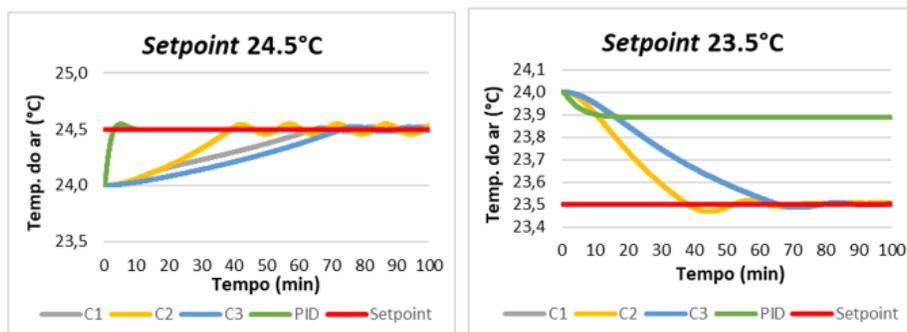


(a)

(b)

Figura 2 – Temperatura do ar frente às perturbações nas condições ambientais

Para o terceiro cenário foi feita uma mudança na temperatura de *setpoint* do ar de 24°C para 23,5°C e 24,5°C. Objetivou-se verificar a capacidade dos controladores de atenderem a demandas de variação dos *setpoints* das zonas. Os resultados da temperatura do ar nas zonas são mostrados na Figura 3 (a) e na Figura 3 (b). Na mudança de *setpoint* para 24,5°C pode-se observar que o PID estabiliza rapidamente atingindo a temperatura de *setpoint* e o MPC tem uma resposta mais lenta, mas consegue alcançar os 24,5°C. Já na mudança para 23,5°C observa-se que o PID não consegue atender a demanda de variação e estabiliza em 23,9°C enquanto o MPC atinge os 23,5°C em torno de 1 hora.



(a)

(b)

Figura 3 - Temperatura do ar nas zonas com mudanças no *setpoint*

Com relação à análise comparativa das três sintonias empregadas para o controlador preditivo, percebe-se que o horizonte de controle de 15 não é suficiente. Isto faz sentido porque tendo-se em mente o período de amostragem de 30s, não se alcança o tempo de estabilização previsto pelas constantes de tempo do processo. Comparando-se os horizontes de predição de 40 e 45, percebe-se que o horizonte de controle de 40 promove

a estabilização necessária. Salienta-se que na estrutura do controlador proposto neste trabalho, não se incorporou a predição de distúrbios medidos e assim, espera-se poder melhorar o desempenho do atual controlador, incorporando-se modelos de predição do efeito da variação da ocupação e das condições ambientais. Finalmente, ressalta-se que o período de amostragem grande de 30s possibilita a execução do controlador preditivo e reduz o número de manipulações no processo, minimizando-se o desgaste dos elementos finais de controle.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, mostrou-se a síntese de um controlador MPC para o controle da temperatura em 35 zonas climatizadas por um sistema de ar condicionado de uma edificação comercial de grande porte chamada de Edifício Moderno. Estruturou-se o controlador preditivo como um problema da programação não linear e restrições operacionais foram explicitamente modeladas. O controlador foi configurado para controlar 35 temperaturas das zonas em *setpoints* fixos e a temperatura da água do evaporador por faixas, manipulando 37 variáveis simultaneamente. O desempenho simulado do controlador MPC proposto foi comparado ao do controlador PID, sintonizado pela técnica IMC. As simulações foram feitas empregando-se a modelagem do Edifício Moderno proposta por Pellegrini *et al.* (2018).

Os resultados mostram que o controlador preditivo desempenhou-se adequadamente para todas as situações a que foi exposto, inclusive condições fora de projeto, diferentemente do controlador PID que não conseguiu acomodar grandes perturbações na ocupação ou nas condições ambientais. As simulações mostram também que há espaço para se melhorar a sintonia do controlador preditivo. A enorme quantidade de parâmetros sintonizáveis do controlador preditivo torna a sua síntese um processo que não é trivial.

REFERÊNCIAS

ALI, M.; VUKOVIC, V.; SAHIR, M. H.; FONTANELLA, G. **Energy analysis of chilled water system configuration using simulation based optimization.** Energy and Building, [S.l.], v.59, p. 111-112, 2013.

ARAÚJO, N. M. **Estudo comparativo do projeto de um sistema VRF com um sistema ar-água para o condicionamento de ar em um edifício comercial de grande porte.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

CAIADO, L. **Desafios da eficiência energética no Brasil.** Disponível em: <<https://cebds.org/desafios-eficiencia-energetica-no-brasil/#.XoPT-4hKjIU>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** EPE, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GARCIA, C. E.; MORARI, M. **Internal Model Control I: A unifying review and some new results.** Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., [S.I.], v. 21, n.21, p. 308-323, 1982.

KILLIAN, M.; KOZEK, M. **Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings.** Buildings and Environment, [S.I.], v. 105, p. 403-412, 2016.

PELLEGRINI, R.L.S; DE ARAÚJO, N.M.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. **Modelling a water-air conditioning system of a large commercial building for energy consumption evaluation.** Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, v. 44, Part C, p. 1963-1968, 2018

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control.** 2nd ed., NJ: John Wiley & Sons, 2004. 736 p.

XIAOCHEN, Z.; CHUNXUAN, Y. **Multivariable IMC-PID within air-conditioned room temperature and relative humidity control system.** In: 33rd. CHINESE CONTROL CONFERENCE., p. 3609-3613. Nanjing, 2014, Proceedings.

WALLACE, M.; McBRIDE, R.; AUMI, S.; MHASKAR, P.; HOUSE, J.; SLASBURY, T. **Energy efficient model predictive building temperature control.** Chemical Engineering Science, [S.I.], v. 69, p. 45-58, 2012.

ZHAO, Z.; YU, N. **The application of advanced control technologies in air conditioning system – a review.** Advances in Building Energy Research, [S.I.], v.11, n. 1, p. 52-66, 2017.

SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR BASEADO EM MODELO DE HAMMERSTEIN UTILIZANDO TRILATERAÇÃO

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

Almir Souza e Silva Neto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), Departamento de Engenharia Elétrica
São Luís – MA

Paulo Henrique Gonçalves Melo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), Departamento de Engenharia Elétrica
São Luís – MA

Fernando Antônio Tocantins Nunes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), Departamento de Engenharia Elétrica
São Luís – MA

RESUMO: Neste trabalho, é proposta uma estratégia de rastreamento de parâmetros baseados no indicador de intensidade de sinal recebido (RSSI) para o sistema de localização indoor. Um modelo de propagação não linear baseado em *Hammerstein* é utilizado para o cálculo da distância, e o algoritmo de triangulação é adotado para a estimativa da posição. Com base em dados práticos adquiridos por um dispositivo Wi-Fi, leituras de RSSI de três dispositivos Wi-Fi são utilizadas para identificar um modelo matemático de propagação baseado no modelo não linear de *Hammerstein*. O algoritmo de mínimos quadrados recursivos

(RLS) é usado para estimar os parâmetros do modelo *Hammerstein* proposto. No contexto de aplicações onde as posições são limitadas a um corredor, um sistema de localização indoor é desenvolvido e testado quanto a sua eficiência em determinar a posição real e obter os parâmetros reais na região monitorada. Os resultados do experimento mostraram um bom comportamento, da estratégia de rastreamento proposta, na presença de interferências e perturbações, uma vez que as leituras de RSSI da região monitorada são bastante oscilatórias em ambientes *indoor*.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo de *Hammerstein*, Sistema de localização indoor, Trilateração.

ABSTRACT: In this work, a strategy of tracing parameters based on the received signal strength indicator (RSSI) for the indoor location system is proposed. A non-linear propagation model based on Hammerstein is used to calculate the distance, and the triangulation algorithm is adopted for position estimation. Based on practical data acquired by a Wi-Fi device, RSSI readings from three Wi-Fi devices are used to identify a mathematical model of propagation based on the non-linear model of Hammerstein. The recursive least squares algorithm (RLS) is used to estimate the parameters of the proposed Hammerstein model. In the context of applications where positions are limited to a corridor, an indoor location system is developed and tested for its efficiency in determining the actual position and obtaining the actual parameters in the monitored region. The results of the experiment showed a good behavior of the proposed tracking strategy

in the presence of interferences and perturbations, since the RSSI readings of the monitored region are quite oscillatory in indoor environments.

KEYWORDS: Hammerstein Model , Indoor location system, Trilateration.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas de localização indoor estão presentes nas áreas comercial, de segurança pública e em aplicações militares. Na área comercial, podem ser usados para enviar propagandas aos consumidores, a medida em que se aproximem de uma determinada parte ou setor de uma loja. Em residências, hospitais e clínicas podem ser usados para localização de equipamentos, médicos, ou enfermeiros, em uma situação emergencial, ou ainda, para rastrear pessoas com necessidades especiais (PAHLAVAN; LATVA-AHO; YLIANTTILA, 2000).

Este artigo, um sistema de localização, foi baseado em tecnologia Wi-Fi composto por um dispositivo receptor e por três pontos de acesso, *Acess Point* (AP). Neste sistema, o dispositivo receptor se localiza a partir das leituras de indicadores de potência do sinal recebido, RSSI, advindas dos sinais emitidos pelos pontos de acesso, e a partir de um modelo matemático da propagação de sinais de radiofrequência, obtidos previamente e empiricamente a partir das leituras de RSSI realizadas pelo dispositivo receptor por meio dos sinais de rádio emitidos pelos três pontos de acesso nos pontos do ambiente em que se deseja localizar. O modelo matemático empregado é o modelo de *Hammerstein*, devido a propriedade de não linearidade da propagação das ondas de rádio. O modelo é obtido a partir dos dados de entrada e saída, RSSI e distâncias entre o dispositivo receptor e os *Acess Points*, respectivamente. O sistema desenvolvido apresenta-se como uma solução de localização indoor eficiente, precisa, flexível e de baixo custo, podendo ser empregada em diversos locais além do utilizado neste trabalho.

2 | SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO

Os sistemas de localização indoor estão presentes em diversos ambientes internos como hospitais, supermercados, escolas, túneis subterrâneos, estações de metrô, lojas, indústrias, sendo empregados em aplicações nas áreas comercial, segurança pública e militares, tais como envio de propagandas para os consumidores, localização de equipamentos na indústria e de médicos e enfermeiros em uma situação emergencial em hospitais, rastreamento de pessoas com necessidades como portadores de deficiências visuais, idosos e crianças (FRATTASI, 2017; GOSWAMI, 2013; KUSHKI; PLATANIOTIS; VENETSANOPOULOS, 2012; SAMAMA, 2008).

3 | TRILATERAÇÃO

Trilateração é um método geométrico que determina a posição de um ponto, a priori desconhecida, a partir das distâncias entre esse ponto e outros três pontos de referências, conforme mostrado na Figura 1, cujas posições sejam conhecidas. No caso 2D, a posição do objeto é determinada pela intersecção de pelo menos três circunferências cujas coordenadas dos centros são as coordenadas dos pontos de referência e os raios são as distâncias entre esses pontos e o objeto alvo (KARIMI, 2015).

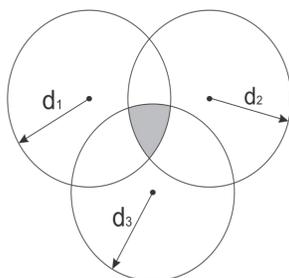


Figura 1 – Intersecção de três circunferências.

Fonte: Kushki, Plataniotis e Venetsanopoulos (2012).

4 | INDICADOR DE INTENSIDADE DE SINAL RECEBIDO (RSSI)

O indicador de intensidade de sinal recebido (RSSI) é um indicador da potência com que o sinal transmitido pelo emissor chega a um determinado receptor. Segundo (KARIMI, 2015),

Existem basicamente duas classes de técnicas que são usadas para encontrar a localização dos alvos usando a intensidade do sinal recebido. A primeira é estimar a distância entre o emissor e receptor a partir da comparação entre a potência do sinal recebido com a do sinal enviado, e uma vez que as distâncias sejam determinadas, a técnica de trilateração pode ser aplicada para se determinar a localização do objeto alvo (DAHLGREN; MAHMOOD, 2014). A segunda técnica envolve a análise de cenários, em que a localização é determinada por meio da correspondência de medições de RSSI em tempo real com o banco de dados armazenado durante a fase de treinamento (BENSKY, 2008). A figura 2 mostra a intensidade vs a distância.

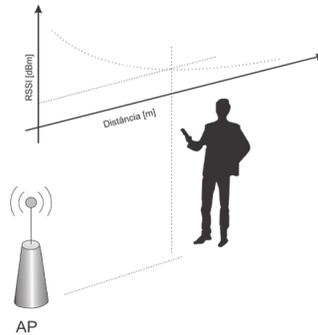


Figura 2 – Intensidade de Potência do Sinal v.s. Distância.

Fonte: Frattasi (2017).

Para se obter as distâncias baseadas em medidas de RSSI, utilizam-se as equações (DAHLGREN; MAHMOOD, 2014).

$$\text{RSSI} = 10n \log_{10} d + A \quad (1)$$

$$d = 10^{(A - \text{RSSI}) / 10 \times n} \quad (2)$$

onde A é a energia absoluta em dBm, que é o valor médio de RSSI medido na distância de um metro na linha de visão até o nó, d é a distância em metros entre transmissor e receptor, n é a constante de propagação que depende do ambiente.

Ao estimar A como a média de várias leituras, juntamente com a leitura do RSSI a distâncias predeterminadas d, a constante de propagação n pode ser calculada (DAHLGREN; MAHMOOD, 2014).

Os sistemas de localização baseados em Wi-Fi e na combinação de RSSI e trilateração utilizam RSSI para estimar a distância entre o AP e o dispositivo móvel, uma vez que a intensidade do sinal varia exponencialmente dependendo da distância entre transmissor e receptor e do ruído aleatório, ao utilizar-se trilateração, três ou mais pontos de acesso são alocados no ambiente. (BENSKY, 2008; KARIMI, 2015).

Neste tipo de abordagem, o algoritmo de localização pode ser empregado no próprio dispositivo móvel a partir dos sinais de radiofrequência transmitidos pelos pontos de acesso ou o dispositivo móvel, transmite sinais de radiofrequência que são recebidos por sensores distribuídos e o servidor estima a localização do dispositivo móvel (ELBAHHAR; RIVENQ, 2012).

5 | MODELO DE HAMMERSTEIN

O modelo de Hammerstein é primeiramente sugerido por Narendra e Gallman em 1966 e vários modelos são testados para melhorar o modelo. Geralmente, o modelo não-linear polinomial sem memória (MPN) para a parte não-linear e o modelo FIR ou o modelo IIR para a parte linear são preferidos em modelos de Hammerstein. O principal benefício dessas estruturas é introduzir menos parâmetros a serem estimados. Além disso, a representação polinomial tem mais flexibilidade e um uso mais simples (LJUNG, 1999).

O modelo de Hammerstein é uma composição de um modelo dinâmico linear em cascata com uma função estática não-linear, conforme mostrado na Figura 3, sendo que a não linearidade estática precede o modelo dinâmico linear (LJUNG, 1994).

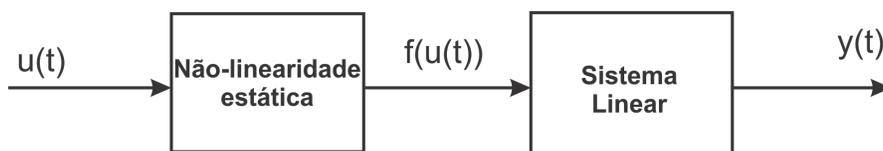


Figura 3 – Modelo de Hammerstein

Fonte: Ljung (1999).

6 | DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO

Neste trabalho, é proposto um sistema de localização para ambientes internos baseado em modelo de Hammerstein e a técnica de trilateração. O modelo baseia-se na variação das leituras de RSSI em função da distância percorrida entre três pontos de acesso e um dispositivo móvel, e é capaz de representar o comportamento não-linear da propagação das ondas de rádio e determinar a distância entre os dispositivos. A técnica de trilateração é então empregada e o dispositivo determina sua própria localização. O algoritmo de Mínimos Quadrados Recursivo é utilizado para a estimação dos parâmetros do modelo de Hammerstein, a partir das leituras de RSSI realizadas em posições distintas e conhecidas. Desta forma, a localização do objeto alvo é determinada em uma formulação, que combina estimativas de distâncias e técnica de trilateração.

No sistema de localização proposto, o dispositivo móvel se auto localiza a partir das leituras que faz das redes de Wi-Fi geradas pelos outros dispositivos móveis com localização conhecida e que participaram do processo de aquisição de dados. Desta forma, uma das vantagens do sistema de localização proposto é a privacidade do usuário, uma vez que não há troca de informações entre os AP's e o dispositivo alvo do sistema de localização. Outra vantagem, é que como não há conexão entre os dispositivos, a quantidade de dispositivos que podem se localizar é ilimitada, devendo apenas ter o modelo de propagação desenvolvido instalados no software do dispositivo.

O sistema de localização proposto consiste em 3 pontos de acesso instalados em um corredor situado em um edifício e em um dispositivo capaz de realizar leituras de RSSI das redes próximas. As etapas necessárias para o desenvolvimento do sistema proposto são mostradas na Figuras 4.

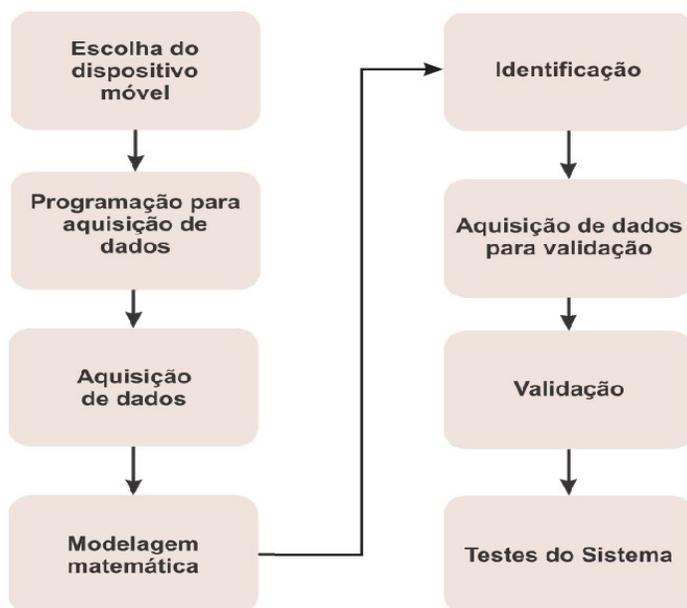


Figura 4 – Etapas do Desenvolvimento do Sistema de Localização

Fonte: Autor.

Leituras de RSSI são realizadas em uma etapa anterior a localização, denominada de aquisição de dados, para o projeto do modelo de propagação aplicado a área de interesse. Para modelagem do sistema de propagação é necessário a aquisição de dados do local em que se deseja localizar. Neste trabalho, o comportamento da propagação das ondas de radiofrequência emitidas pelos AP's é mapeada por meio da coleta de amostras de sinais de RSSI obtidas a partir de um quarto dispositivo NodeMcu ESP32. Esses dados juntamente com a informação quanto as posições em que as amostras são coletadas e utilizadas como dados de entrada e saída, respectivamente, para obtenção do modelo de Hammerstein por meio do algoritmo de mínimos quadrados recursivos. A aquisição de amostras de RSSI é realizada a partir de posições conhecidas da área de interesse, conforme mostra a Figura 5.

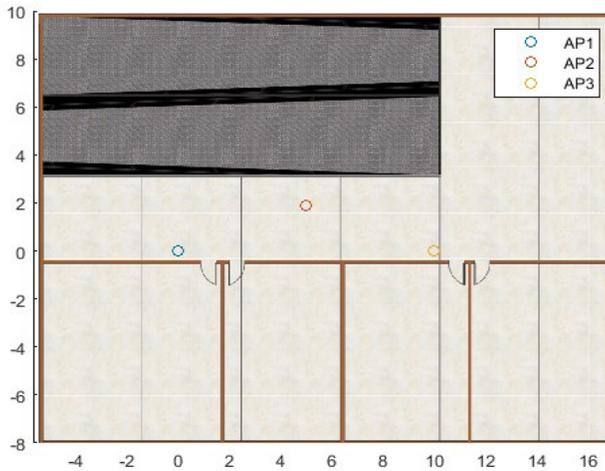


Figura 5 – Pontos de Medição

Fonte: Autor.

Devido a dinâmica não linear da propagação das ondas de rádio em função da distância e devido as dificuldades em se encontrar um modelo físico que descreva todos os fenômenos presentes na propagação das ondas de rádio, ainda mais quando se trata de ambientes indoor, e que o fator de perda de propagação, η , é variante na área de interesse, neste trabalho, é escolhido o modelo matemático não linear de Hammerstein, devido a sua simplicidade e eficiência, uma vez que é composto por uma parte não linear, denominada de não linearidade estática em cascata com um modelo linear. No presente trabalho, a não-linearidade estática do modelo é representada por um polinômio sem memória e o modelo linear é representado pelo filtro FIR, e o modelo de Hammerstein é dado conforme as equações 3 e 4.

$$F(u) = \alpha_1 u + \alpha_2 u^2 + \dots + \alpha_m u^m \quad (3)$$

$$y(k) = b_1 F(u(k-1)) + \dots + b_m F(u(k-m)) \quad (4)$$

Após a escolha do modelo para representar a propagação das ondas de rádio na área de interesse, segue-se a estimação e validação do modelo, bem como, os testes quanto a precisão e eficiência da estratégia considerada dos 3 pontos de acesso, AP1, AP2 e AP3. A validação dos modelos de Hammerstein é obtida a partir da comparação entre a posição real do dispositivo móvel e a posição estimada pelo modelo mostradas nas Figuras 6, 7 e 8.

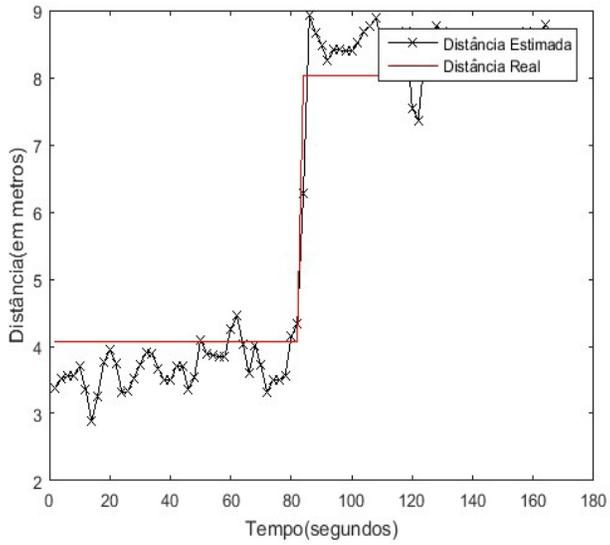


Figura 6 – Comparação entre a distância estimada pelo Modelo de AP1 e a real

Fonte: Autor.

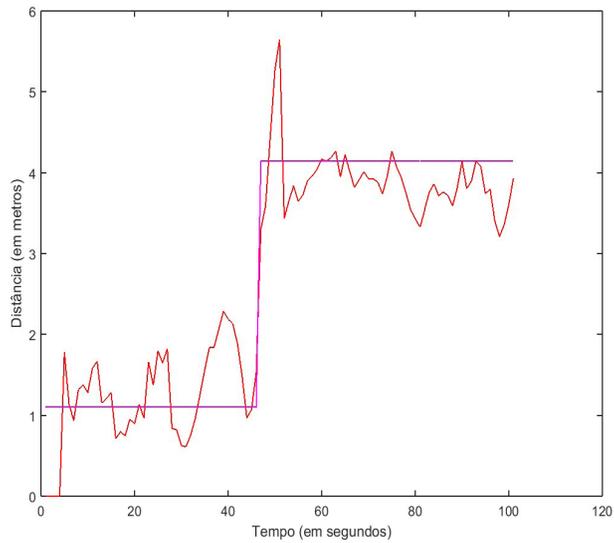


Figura 7 – Comparação entre a distância estimada pelo Modelo de AP2 e a real

Fonte: Autor.

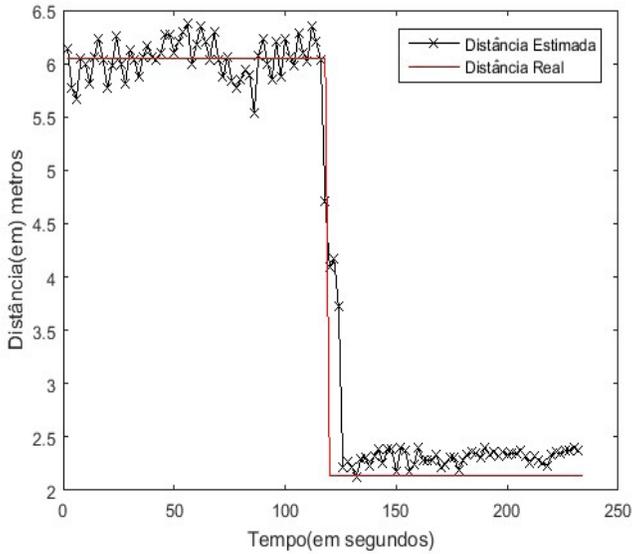


Figura 8 – Comparação entre a distância estimada pelo Modelo de AP3 e a real

Fonte: Autor.

A partir das Figuras 6, 7 e 8, os modelos de propagação são validados, uma vez que foram capazes de estimar as distâncias reais.

O modelo obtido para AP1 é dado nas equações 5 e 6.

$$F(u) = \alpha_1 + \alpha_2 u^1 \cdots + \alpha_6 u^6 \quad (5)$$

onde,

$\alpha_1 = -1444.59$, $\alpha_2 = -97.95$, $\alpha_3 = -2.59$, $\alpha_4 = -0.033$, $\alpha_5 = -0.000208$, $\alpha_6 = -0.000000503$.

$$y(k) = 0.5882 * F(u(k - 1)) + 0.5882 * F(u(k - 2)) - 0.05277 * F(u(k - 3)) + 0.05277 * F(u(k - 4)) + 0.05277 F(u(k - 5)) \quad (6)$$

O modelo obtido para AP2 é dado nas equações 7 e 8.

$$F(u) = \alpha_1 + \alpha_2 u^1 + \cdots + \alpha_7 u^6 \quad (7)$$

onde,

$\alpha_1 = 152.990801181410e - 006$, $\alpha_2 = 66.2123251928018e - 003$, $\alpha_3 = 11.9205006383281e + 000$, $\alpha_5 = 61.5213156099039e + 003$, $\alpha_6 = 1.76364972802158e + 006$, $\alpha_7 = 21.0331265618800e + 006$.

$$y(k) = 0.2405 * F(u(k - 1)) + 0.208 * F(u(k - 2)) + 0.208 * F(u(k - 3)) + 0.141 * F(u(k - 1)) + 0.141 F(u(k - m)) \quad (8)$$

O modelo obtido para AP3 é dado nas equações 9 e 10.

$$F(u) = \alpha_1 u + \alpha_2 u^2 + \dots + \alpha_m u^m \quad (9)$$

onde,

$$\alpha_1 = -1.81650855396232e - 006, \alpha_2 = -669.853827663586e - 006, \alpha_3 = -97.5862782840168e - 003, \alpha_4 = -7.01751431758820e + 000, \alpha_5 = -249.279965552858e + 000, \alpha_6 = -3.50165177935238e + 003.$$

$$y(k) = 0.394 * F(u(k - 1)) + 0.146 * F(u(k - 2)) - 0.053 * F(u(k - 3)) + 0.146 * F(u(k - 1)) + 0.394 F(u(k - m)) \quad (10)$$

Uma vez que os modelos de propagação foram identificados, segue-se a aplicação do algoritmo de trilateração para a determinação da posição do dispositivo receptor móvel. Nas Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 são mostradas as estimativas das posições através da combinação das estimativas das distâncias entre os AP's e o dispositivo móvel e o algoritmo de trilateração. É possível observar que a metodologia aplicada apresenta-se eficiente e precisa, onde os símbolos losango, ponto central das circunferências, e o "x" vermelho são respectivamente a posição estimada do dispositivo móvel, a posição dos AP's e a posição real. As circunferências possuem o raio igual a distância estimada entre os AP's e o dispositivo móvel.

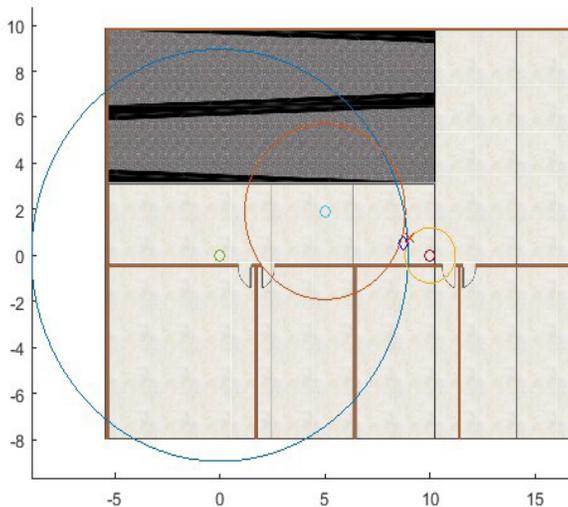


Figura 9 – Objeto móvel a 9m da posição de origem.

Fonte: Autor.

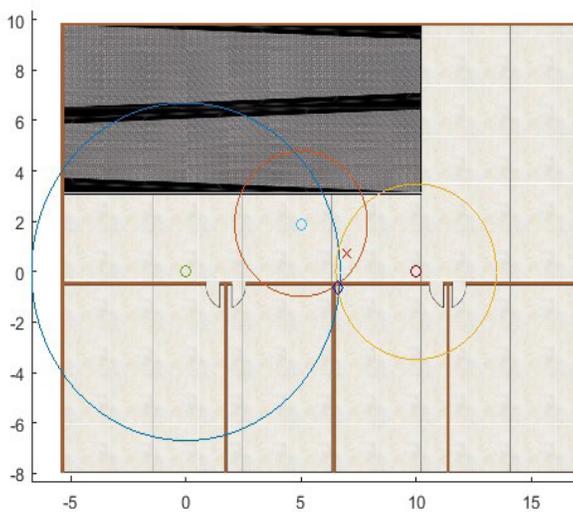


Figura 10 – Objeto móvel a 7m da posição de origem

Fonte: Autor.

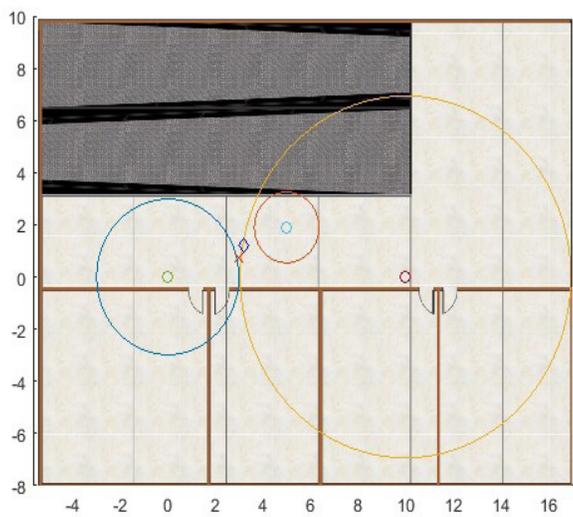


Figura 11 – Objeto móvel a 3m da posição de origem

Fonte: Autor.

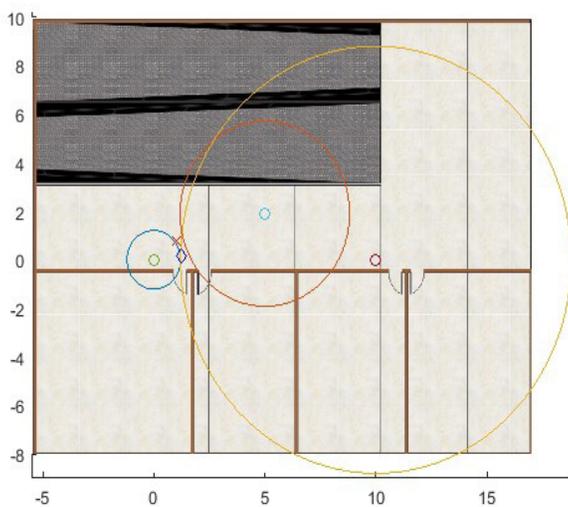


Figura 12 – Objeto móvel a 1m da posição de origem

Fonte: Autor.

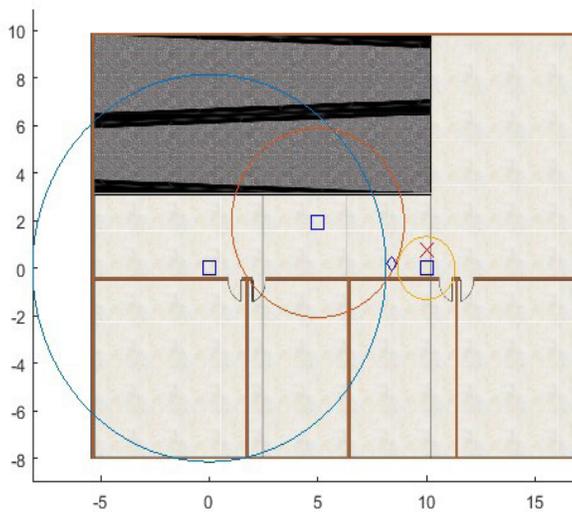


Figura 13 – Objeto móvel a 10m da posição de origem

Fonte: Autor.

A tabela 01 mostra os dados da precisão do modelo desenvolvido.

Distância em m d			Posição Real (m)		Posição Estimada (m)		Erro absoluto (m)	
AP1	AP2	AP3	X	Y	X	Y	X	Y
8,96	8,14	1,20	9,00	0,75	8,74	0,53	-0,26	-0,22
6,70	2,88	3,48	7,00	0,75	6,62	-0,62	-0,37	-1,37
1,20	3,81	8,80	1,00	0,75	1,25	1,71	0,25	-0,57
2,98	1,35	6,95	3,00	0,75	3,20	1,23	0,20	0,47

Tabela 01 – Precisão do Sistema Desenvolvido

Fonte: Autor.

7 | CONCLUSÕES

A capacidade das ondas eletromagnéticas de se propagarem é diferenciada de acordo com cada ambiente de propagação, sendo que em sinais de rádio irradiados por um transmissor é uma função do espaço, frequência e tempo. Diferentemente do espaço livre, em ambientes indoor, a propagação das ondas de rádio são afetadas por obstruções tais como, parede, janela, móveis ou pessoas podem afetar o sinal de propagação de três formas distintas, por reflexão, difração ou dispersão.

Devido a esses fenômenos, vários são os modelos físicos desenvolvidos para sistemas de localização indoor devido à dificuldade de se representar a propagação nestes ambientes. Modelos gerais de sistemas para localização indoor são difíceis de serem alcançados devido as características inerentes de cada ambiente.

A maioria dos modelos de perda de trajetória utilizam a adaptação da fórmula de Log Normal para modelar matematicamente a relação entre o RSSI e a posição do dispositivo móvel. Porém, este modelo não reflete duas características de RSSI em ambientes reais. Primeiro, esse modelo assume contornos isotrópicos de RSSI - uma suposição frequentemente violada devido à distribuição assimétrica de objetos bloqueadores, como paredes e móveis. Em segundo lugar, este modelo é invariante à orientação do receptor, sendo os valores de RSSI são altamente dependentes da orientação do dispositivo.

REFERÊNCIAS

BENSKY, A. *Wireless Positioning Technologies and Applications (Technology and Applications)*. [S.l.]: ARTECH HOUSE, INC., 2008.

DAHLGREN, E.; MAHMOOD, H. *Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology*. 2. ed. [S.l.]: Göteborg, 2014.

ELBAHHAR, F. B.; RIVENQ, A. *New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems*. [S.l.]: InTech, 2012.

FRATTASI, F. D. R. S. *Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques*. 2. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2017.

GOSWAMI, S. **Indoor Location Technologies**. 1. ed. [S.I.]: Springer-Verlag New York, 2013.

KARIMI, H. A. **Indoor wayfinding and navigation**. [S.I.]: CRC Press, 2015. Citado 9 vezes nas páginas 22, 23, 24, 27, 31, 37, 40, 41 e 42.

LJUNG, L. **System Identification: Theory for User. 1**. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 1994.

LJUNG, L. **System Identification: Theory for User. 2**. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 1999.

PAHLAVAN, X. K.; LATVA-AHO, M.; YLIANTTILA, M. **Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems**. [S.I.]: Proceedings of the 52nd Vehicular Technology Conference (IEEE-VTS Fall VTC '00), vol. 6, pp. 3015–3020, Boston, Mass, USA, 2000.

SAMAMA, N. **Global Positioning: Technologies and Performance**. 2. ed. [S.I.]: New York: Wiley-Interscience, 2008.

ESTUDO EXPERIMENTAL DA ARGILA KIMBERLITO DO BRASIL NA APLICAÇÃO DE ANTENAS RESSOADORAS DIELÉTRICAS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS

Data de aceite: 01/06/2021

Diêgo da Mota Colares

Departamento de Engenharia de telecomunicações, Departamento de Física - Universidade Federal do Ceará (UFC), LOCEM-Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), Campus PICI Fortaleza, Ceará, Brasil

Roterdan Fernandes Abreu

Departamento de Engenharia de telecomunicações, Departamento de Física - Universidade Federal do Ceará (UFC), LOCEM-Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), Campus PICI Fortaleza, Ceará, Brasil

João Paulo Costa do Nascimento

Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Ceará, PPGET Fortaleza, Ceará, Brasil

Juscelino Chaves Sales

Universidade do Vale do Acaraú, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil

Antonio Sergio Bezerra Sombra

Departamento de Engenharia de telecomunicações, Departamento de Física - Universidade Federal do Ceará (UFC), LOCEM-Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM), Campus PICI Fortaleza, Ceará, Brasil

RESUMO: Foi realizada uma análise das características dielétricas na faixa de micro-ondas da argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil para verificar alguma possível aplicação tecnológica que opere na faixa de micro-ondas. Para fazer as análises elétricas em micro-ondas foi fabricado por meio dessa argila um ressoador dielétrico. Para o amoldamento desse ressoador foram usadas uma fôrma metálica cilíndrica e uma prensa uniaxial cuja pressão foi de 176,21 Mpa por 5 minutos. Posteriormente, a amostra foi sinterizada na temperatura de 1100 °C por 4 horas saindo da temperatura ambiente. Após o processo de produção do ressoador dielétrico cilíndrico cerâmico, foram realizadas as análises elétricas que indicaram uma permissividade relativa de 5,14, tangente de perda de 0,038, perda de retorno de -40,09 Db, frequência de ressonância de 7,93 GHz. Tais parâmetros indicam que esse material pode ser aplicado como DRA que opera na banda C (4-8 GHz).

PALAVRAS-CHAVE: Antenas, micro-ondas, DRA.

EXPERIMENTAL STUDY OF BRAZILIAN KIMBERLITO CLAY IN THE APPLICATION OF DIELECTRIC RESSONATOR ANTENNA IN THE MICROWAVE RANGE

ABSTRACT: An analysis of the dielectric characteristics in the microwave range of red clay from Argila Kimberlito do Brasil was carried out to verify any possible technological application that operates in the microwave range. To perform electrical analysis in microwave, a dielectric resonator was manufactured using this clay. For the shaping of this resonator, a cylindrical metal

formwork and a uniaxial press were used whose pressure was 176.21 Mpa for 5 minutes. Subsequently, the sample was sintered at 1100 °C for 4 hours leaving room temperature. After the production process of the ceramic cylindrical dielectric resonator, electrical analyzes were performed that indicated a relative permittivity of 5.14, loss tangent of 0.038, return loss of -40.09 Db, resonance frequency of 7.93 GHz . Such parameters indicate that this material can be applied as DRA that operates in the C band (4-8 GHz).

KEYWORDS: Antennas, microwaves, DRA.

INTRODUÇÃO

Tendo-se em vista a necessidade de inovação tecnológica em dispositivos de micro-ondas, foram lançadas procuras incansáveis por antenas ressoadores dielétricas (DRAs). O uso das DRAs em telecomunicações é bem interessante, pois as perdas por irradiação são mínimas e essas podem ser facilmente compactadas em circuitos eletrônicos [1-3]. Conseqüentemente, as cerâmicas dielétricas obtiveram destaque, porque é essa classe de material utilizada em DRAs. Dentre as diversas classes de cerâmicas, pode-se citar as Argilominerais que são encontradas na natureza e são formadas por silicatos de Al, Fe e Mg hidratados, com estruturas cristalinas em camadas [4].

Dentro desse contexto, este trabalho buscou analisar as propriedades elétricas em micro-ondas da argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil. Primeiramente, foi feito um cilindro cerâmico da argila vermelha afim de extrair o coeficiente de temperatura de frequência ressonante (τ_f) por meio do método Silva-Fernandes-Sombra (SFS). Segundamente, foram mesurados a frequência ressonante, perda de retorno e permissividade relativa por meio da técnica desenvolvida por Long, Macllister e Shen [5-6]. Além das medidas experimentais, foram usadas simulações computacionais por meio do programa HFSS com objetivo de validar os dados obtidos experimentalmente e obter parâmetros de antenas da peça cerâmica, como: diagrama de radiação, diretividade, ganho e eficiência de radiação eletromagnética.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a preparação das amostras foram pesados 3,5 gramas da argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil. O material foi submetido à pressão uniaxial de 176,21 MPa em formato de cilindro por 5 minutos. Posteriormente, as peças foram sinterizadas a 1100°C por 4h em um forno controlado. Foram feitas medidas do coeficiente de temperatura da frequência ressonante (τ_f) através do método Silva-Fernandes-Sombra (SFS) [7]. Esse método consiste em medir o modo elétrico transversal (TE_{011}) ao longo de um gradiente de temperatura por meio de um ressoador de haste dielétrica. Essa medida para DRA é para saber o quanto a frequência ressonante se altera com a mudança de temperatura no qual o material foi submetido.

Sabe-se que ao submeter certo material à uma variação de temperatura esse dilatará. Então, quando uma DRA sofre mudanças de temperatura será obtido expansão ou contração do material ,consequentemente, isso irá alterar também a frequência de ressonância da DRA. A Figura 1 ilustra a vista lateral do método Silva-Fernandes-Sombra. Matematicamente, o τ_f é calculado pela equação (1).

$$\tau_f = \frac{1}{f_i} \frac{\Delta f}{\Delta T} 10^6 \text{ ppm. } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (1)$$

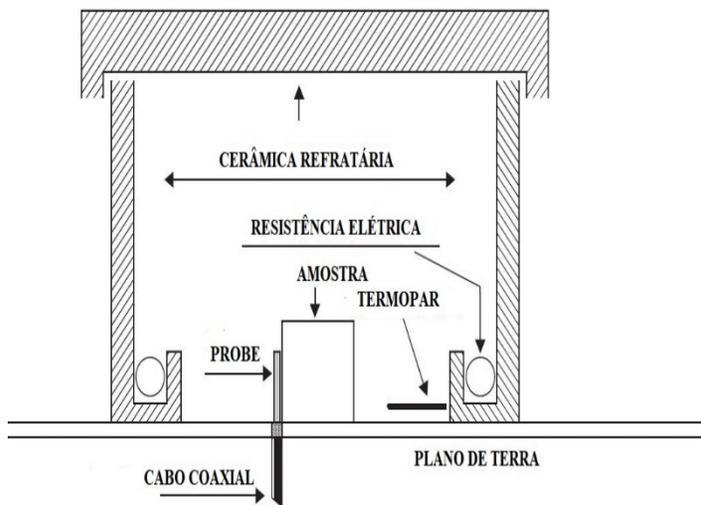


Figura 1- Vista lateral do método Silva-Fernandes-Sombra.

Para analisar a aplicação da peça cerâmica em estudo como DRAs, foram feitas medidas de monopolo por meio de um analisador de rede[6]. Tal equipamento é formado por um *probe*, plano de terra e analisador de rede. Para uma medição de qualidade é indicado que a DRA deverá permanecer perto da sonda. Vale lembrar que para aplicações em antenas é necessário que a perda retorno seja de -10 dB. Dessa forma, a perda de retorno é um dos parâmetros fundamentais de mensurações em antenas [3]. Assim, a DRA submetida a este processo irá atuar no modo HE_{110} , e sua frequência de ressonância será aquela em que a perda de retorno é mínima. A figura 2 ilustra a medida de monopolo.

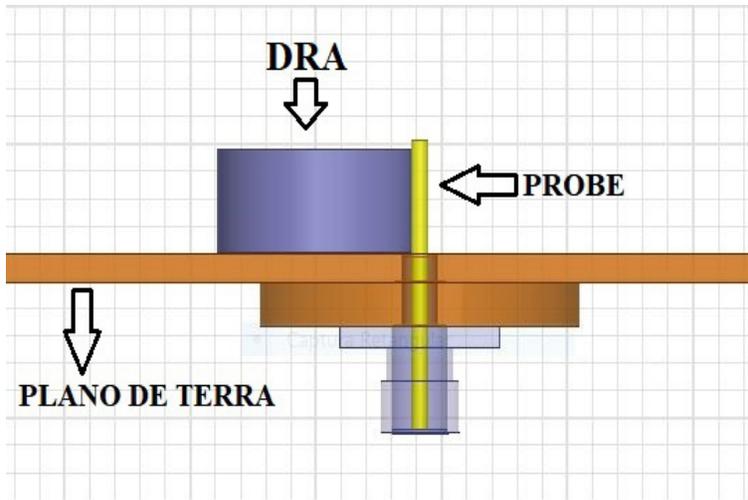


Figura 2- Vista lateral da medida de monopolo.

Segundo a literatura [8], a frequência ressonante, largura de banda BW , e o fator de qualidade Q podem ser calculados com precisão de acordo com as seguintes equações,

$$f_{(HE_{11\delta})} = \frac{6.324c}{2\pi a \sqrt{\varepsilon_r + 2}} \left[0.27 + 0.36 \left(\frac{a}{2h} \right) + 0.02 \left(\frac{a}{2h} \right)^2 \right] \quad (2)$$

e

$$Q_{(HE_{11\delta})} = 0.01007 (\varepsilon_r^{1.3}) \cdot \frac{a}{h} \left[1 + 100e^{-2.05 \left(\frac{a}{2h} - 0.0125 \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right)} \right] \quad (3)$$

E desta forma, usando o analisador de rede Agilent N5230A foi possível obter a permissividade relativa, frequência de ressonância, perda de retorno da amostra. Entretanto, deve-se destacar que a presença de gaps indicados na Figura 2 influenciam diretamente a largura de banda e na correspondência das impedâncias. Por fim, com o intuito de obter os parâmetros de campo distantes foi utilizado o software Ansoft HFSS® (*High Frequency Structure Simulator*). Esse software simula campos eletromagnéticos e projeta componentes de alta frequência através do método de elementos finitos. E a partir dessa simulação, foi possível obter os parâmetros: diretividade, ganho, eficiência da antena e diagrama de radiação e etc.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização elétrica em micro-ondas utilizando método Silva-Fernandes-Sombra e medidas de Monopolo são mostradas na Tabela 1.

Amostras	D (mm)	H (mm)	ϵ_r	$\tan \delta$	S_{r1} (Db)	f_r (GHz)	Q	τ_r (ppm°C ⁻¹)
Vermelha	14,46	7,60	5,14	0,038	-40.09	7,93	12,64	-34,27

Tabela 1- D (Diâmetro), H (altura), ϵ_r (constante dielétrica), $\tan \delta$ (tangente de perda), f_r (frequência de ressonância), Q (Fator de qualidade) e τ_r (coeficiente de temperatura da frequência ressonante).

Pela tabela 1, a amostra apresentou uma perda de retorno -40,09 dB. Quando uma amostra possui pelo menos que -10 dB para perda de retorno, isso já indica que, esse material pode ser aplicado como DRA. Pode-se ver pela figura 3 o comportamento da frequência em função da temperatura. Esse comportamento é justificado pelo valor do τ_r , de -34,27 ppm°C⁻¹.

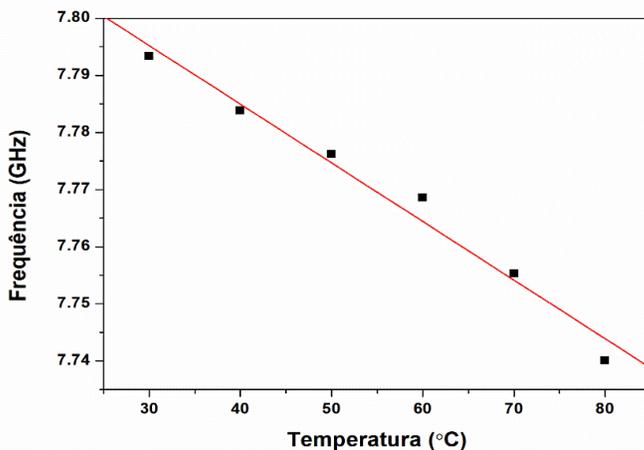


Figura 3- Gráfico Frequência versus Temperatura.

Os dados de entrada para a simulação de DRA adotado neste trabalho estão na Tabela 2.

Amostra	D (mm)	R (mm)	H (mm)	ϵ_r	f_r (GHz)	$\text{tg} \delta$
Vermelha	14,46	7,23	8,19	5,14	7,93	0,038

Tabela 2- D (Diâmetro), H (altura), ϵ_r (constante dielétrica), $\tan \delta$ (tangente de perda), f_r (frequência de ressonância), Q (Fator de qualidade) e τ_r (coeficiente de temperatura da frequência ressonante).

As Figuras 4,5 e 6 mostram os valores experimentais e simulados para a perda de retorno, impedância real e imaginária.

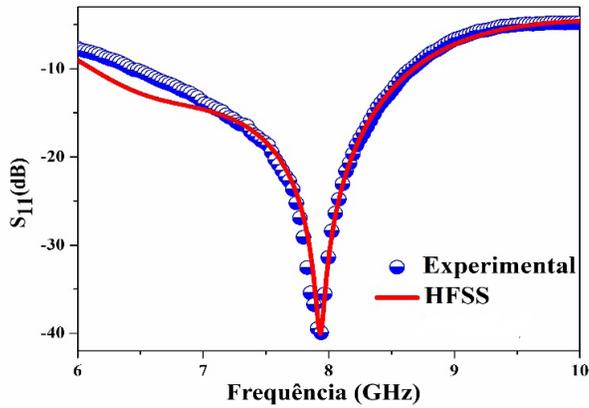


Figura 4- Gráfico S_{11} versus frequência

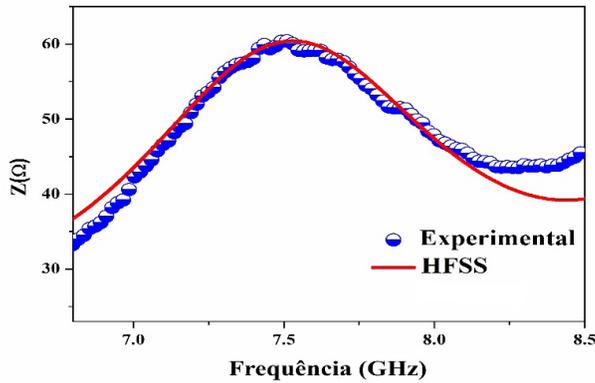


Figura 5- Gráfico Z versus frequência

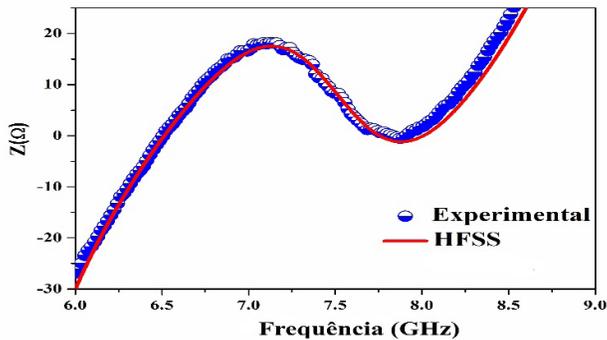


Figura 6- Gráfico Z' versus frequência

Os resultados obtidos demonstram que a simulação realizada foi adequada, pois os resultados experimentais e simulados estão bem aproximados. A partir da simulação realizada, os parâmetros de campo distante das antenas foram obtidos e são mostrados na Tabela 3.

Amostra	Diretividade (dB)	Ganho (dB)	P_{in} (W)	P_{rad} (W)	E (%)
VERMELHA	6,91	6,09	0,99	0,83	83

Tabela 3. Diretividade; Ganho; Potência inserida (P_{in}); Potência radiada(P_{rad}); Eficiência (E)

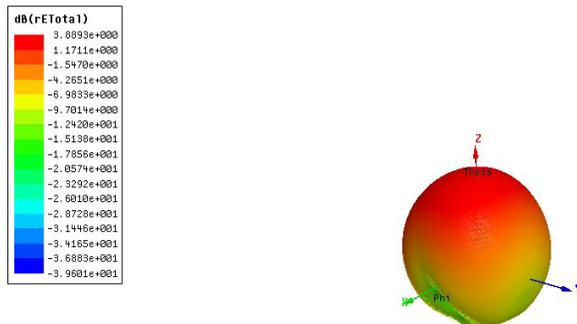


Figura 7- Padrão de Radiação 3D

Ao analisar a Tabela 3, é possível observar que o ganho e eficiência de radiação são consideravelmente altos assim como a eficiência da amostra. Esse resultado pode ser considerado como promissor, pois a DRA consegue radiar mais energia no espaço. Com isso, esses resultados sugerem potenciais aplicações para a argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil como DRA's ou outros dispositivos que operam na faixa de micro-ondas, tais como filtros de micro-ondas, osciladores e detectores de radar [1-3].

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigado as propriedades elétricas da argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil em micro-ondas. Com isso, foi obtido uma perda de retorno S_{11} de -40 dB juntamente com uma frequência ressonante de 7,93 GHz. Além disso, a amostra apresenta um coeficiente de temperatura da frequência de $-34,27 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}^{-1}$. Pela simulação no HFSS da amostra analisada, foi calculado Ganho de 6,09 Db e Eficiência de Radiação de 83%. Esses resultados são bem interessantes, porque é necessário que a DRA possa irradiar mais energia eletromagnética do que perde ou absorve. Logo, este estudo indica que argila vermelha da empresa Argila Kimberlito do Brasil pode ser usada na fabricação de dispositivos de micro-ondas que operem na faixa C de telecomunicações, como radar de vigilância de aeroportos, radar meteorológico, radar de navios de superfície e satélites de comunicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (402045 / 2013-0), ao Escritório de Pesquisa Científica da Força Aérea dos EUA (AFOSR) (FA9550-16-1-0127) e ao CNPq (Processo:

REFERÊNCIAS

- [1] Darko Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Second Edi (Noble Publishing Corporation Atalnta, 1998)
- [2] M.T. Sebastian, *Dielectric Materials for Wireless Communication* (Elsevier Science, 2008).
- [3] A. Petosa, *Dielectric Resonator Antena Handbook* (Artech House Publishers, 2007).
- [4] VIEIRA COELHO, A. C.; SANTOS, P. D. S.; SANTOS, H. D. S. Argilas especiais: O que são, caracterização e propriedades. *Quimica Nova*, v. 30, n. 1, p. 146–152, 2007.
- [5] M.W. McAllister, S. A. Long, and G. L. Conway, *Electron. Lett.* 19, 218 (1983).
- [6] S.A. Long, M.W. McAllister, L.C. Shen, “The resonant cylindrical dielectric cavity antenna”, *IEEE Trans. Antennas Propag.* AP-31, no. 3, pp. 406–412, 1983.
- [7] SILVA, M. A. S.; FERNANDES, T. S. M.; SOMBRA, A. S. B. An alternative method for the measurement of the microwave temperature coefficient of resonant frequency (τ_f). *Journal of Applied Physics*, v. 112, n. 7, p. 074106, out. 2012.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. (Wiley, 2011).

LEVANTAMENTO DE NÃO CONFORMIDADES TÉRMICAS (NCT) ATRAVÉS DE ANÁLISES TERMOGRÁFICAS NA SUBESTAÇÃO FORTALEZA II DA COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO

Data de aceite: 01/06/2021

Fagner Leite Sales

Técnico em Eletrotécnica, Acadêmico de
Engenharia Elétrica

PALAVRAS-CHAVE: Termografia, Inspeção Termográfica, Termovisor, Manutenção, Sistema Elétrico.

INTRODUÇÃO

No Sistema Elétrico de Potência (SEP) existem pilares que estão sempre sendo monitorados e, constantemente, se buscam maneiras que melhorem seu desempenho. Dois destes pilares de sustentação que podemos exemplificar são a disponibilidade do sistema e a confiabilidade do mesmo. A discussão a respeito destes assuntos sempre está em pauta junto a diretores de empresas de geração, transmissão e distribuição, operadores de sistema ou ainda em agências reguladoras, tudo para que o SEP como um todo esteja cada vez mais robusto e fundamentado. Planos rotineiros de manutenção preventiva para os equipamentos cada vez mais específicos e direcionados para corrigir defeitos crônicos e recorrentes e o uso de tecnologias avançadas fazem parte das melhorias contínuas que o Sistema passa. Nesse contexto é preciso destacar a termografia como um forte aliado para diminuição das indisponibilidades do SEP, uma

vez que, quando as inspeções termográficas são realizadas em correta periodicidade, vemos resultados na detecção precoce de Não Conformidades Térmicas (NCT's). Segundo Possi (2014, p.47) “a termografia é uma técnica que permite mapear uma região com a utilização de um aparelho específico, conhecido como termógrafo, para distinguir diferentes temperaturas por meio da radiação infravermelha naturalmente emitida pelos corpos, de modo que depois de feita a coleta de informação possa desenvolver uma análise técnica das imagens obtidas pelo aparelho”. Em outras palavras podemos simplificar usando o que a física há muito tempo nos revelou. Todo corpo com temperatura acima do zero Kelvin (-273°C) apresentará um certo grau de agitação molecular em maior ou menor grau e, com isso, emitirá radiação. É essa radiação que é captada pelo aparelho (termógrafo) e transformada em imagem térmica que nos mostra qualquer anomalia existente nas conexões dos equipamentos. As inspeções realizadas no mês de abril na subestação Fortaleza II, da Chesf, buscaram identificar tais anomalias e avaliar os prazos para correção a fim de que o Sistema não seja prejudicado por um eventual corte de cargas.

MÉTODO

Há um trabalho periódico realizado nas

subestações da Chesf ao qual os Operadores de Instalação (OPI), que foram treinados e capacitados para serem profissionais termografistas, percorrem todo o pátio de equipamentos e monitoram, com o auxílio do termógrafo, as conexões elétricas dos equipamentos e barramentos da instalação. Sempre que há qualquer anormalidade percebida esta é registrada num sistema, denominado Termosist, para que possa ser programada a correção naquela conexão. Foi monitorado durante todo o mês de abril de 2020 as NCT's encontradas na subestação Fortaleza II, uma das mais importantes para o sistema de transmissão de energia da cidade, e registrado tudo o que foi encontrado. Na Companhia há uma Norma de Manutenção, direcionado às equipes de operação e manutenção das instalações, que instrui todas os requisitos necessários de pessoal, material e condições ambientais e de carregamento das linhas para realização das inspeções termográficas. Foi seguindo esta norma que realizamos o levantamento de campo na subestação Fortaleza II. Precisamos salientar que existem prazos diferentes para realização da inspeção em cada componente da instalação. A tabela 1 mostra a periodicidade máxima das inspeções termográficas das instalações, elementos e eventos.

Instalação / Elementos / Eventos	Periodicidade Máxima
Instalação completa (Todos os equipamentos de pátio subestação)	
Na inspeção da instalação, observar: <ul style="list-style-type: none"> • Nível de óleo em tanque de expansão (conservador). • Componentes do sistema de comando de ventilação forçada, com os 02 (dois) estágios de ventilação operando pelo menos por 30 minutos. • Radiadores (se estão isolados ou não). • Relé de gás e registros associados (se estão abertos ou não). • Relé de fluxo do comutador CDC e registros associados, quando aplicável (se estão abertos ou não). • Pontos de réguas associados aos secundários dos TC de buchas de autotransformadores, transformadores e reatores. • Buchas de autotransformadores, transformadores e reatores. • Banco de capacitor e reator a seco. 	Semestral
Cubículos de alimentação em média tensão dos serviços auxiliares e equipamentos associados.	
Painéis em baixa tensão, retificadores e baterias (serviço auxiliar).	
Painéis da sala de comando.	Semestral (Nota 1)
Armários de comando e controle de autotransformadores, transformadores, reatores e disjuntores (pátio).	
Muflas.	
Chave de by-pass.	(Nota 2)

Conexões e equipamentos associados a ocorrências.	Até 72h após ocorrência ou energização (Nota 3)
Ocorrência em que seja utilizado o circuito de transferência (inspecionar este circuito).	
Curtos-circuitos em terminais de linha, barramento, transformador ou reator de tensão a partir de 69 kV.	
Energização de novos equipamentos.	

Tabela 1 - Periodicidade máxima das inspeções termográficas das instalações, elementos e eventos

Fonte: Norma de Manutenção Chesf - NM-MN-SE-S.001, 2019

Nota 1: Deve-se fazer referência aos painéis, armários, cubículos e demais itens de serviço auxiliar inspecionados no RAT (Relatório de Acompanhamento da Termografia) do período em que foram realizadas as inspeções de forma a manter o controle da periodicidade.

Nota 2: A verificação das chaves by-pass deve ser realizada quando da transferência de disjuntores e religadores.

Nota 3: Caso as barras da subestação estejam conectadas à geração e esta ainda não totalmente recomposta, a inspeção termográfica deverá ser realizada todos os dias até o pleno restabelecimento da geração associada à subestação.

O inspetor termografista deve ter passado por treinamento e possuir certificação para realizar as inspeções termográficas. O instrumento, termógrafo (modelo utilizado Flir T420), deve estar em dia com sua validade de calibração e também deve passar por ajustes antes das inspeções, a fim de que a leitura possa ser a mais precisa possível. Os ajustes são:

- a) Condições ambientais = temperatura e umidade;
- b) Distância média de inspeção entre a câmera e os objetos;
- c) Emissividade = 0.85;
- d) Paleta de cor = ferro;

É recomendado também que as inspeções termográficas aconteçam, sempre que possível, após o pôr-do-sol, porém a prioridade é o horário de maior carregamento. É necessário também que o inspetor tenha em mãos as seguintes leituras operacionais:

- a) Corrente de inspeção;
- b) Corrente histórica;
- c) Corrente máxima;
- d) Corrente limite operacional do bay.

Estas informações são importantes pois servirão para alimentar o sistema Termosist toda vez que uma NCT for encontrada e se fizer necessária a abertura de um novo RIT

(Relatório de Inspeção Termográfica).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi possível, através das inspeções, encontrar 3 (três) novos pontos onde constavam Não Conformidades Térmicas e, assim, abrir Notas de Manutenção para que a equipe de manutenção pudesse, a partir da disponibilidade de serviços, programar a correção ou realizar a melhoria nas conexões. Mostraremos neste trabalho a NCT encontrada no circuito de ventilação forçada de um Transformador de Potência de 500KV. Este trabalho mostra a eficiência da inspeção que, através do seu papel preventivo, melhora a disponibilidade e a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP). A inspeção termográfica na subestação Fortaleza II aconteceu durante todo o mês de abril, de modo a percorrer todo o pátio de equipamentos e salas de serviços auxiliares. A Não Conformidade Térmica encontrada e que vamos relatar resultou na abertura do Relatório de Inspeção Termográfica DORFT.95.2020 (denominação para rastreabilidade do RIT). A imagem térmica do equipamento (Figura 1 e Figura 2) nos permite visualizar o sobreaquecimento na conexão da fase B.



Figura 1 - Imagem Térmica

Fonte: Chesf, 2020



Figura 2 - Foto disjuntor tripolar

Fonte: Chesf, 2020

No momento da inspeção as condições de carregamento eram as seguintes (conforme tabela 2):

TIPO	ÓRGÃO	INSPECTOR	DATA INSPEÇÃO	DATA CONCLUSÃO
Inicial	DORFT	T.O.L.	11/04/2020	12/04/2020
HORA INSPEÇÃO	DISTÂNCIA (m)	UMID. REL. (%)	TEMP. AMB. (°C)	LIM. OPERACIONAL (A)
17:00	1	55	25	50
N.L.O. (A)	CORRENTE INSP. (A)	CORRENTE HIST. (A)	CORRENTE MÁX. (A)	INSPEÇÃO/HISTÓRICA (%)
50	50	50	50	100

Tabela 2 – Condições da inspeção

Fonte: Norma de Manutenção Chesf - NM-MN-SE-S.001, 2019

A tabela X do Normativo NM-MN-SE-S.001 da Chesf sugere as seguintes recomendações para componentes de painéis CA que atendem Serviços Auxiliares:

TABELA X – Outros equipamentos e componentes, tais como: Painéis CA e CC de serviços Auxiliares e Equipamentos. Motoventiladores, cabos em canaletas.			
Método	Normal (ΔT °C)	Nível 1 (ΔT °C)	Nível 2 (ΔT °C)
COMPARATIVO	≤ 10	$< \Delta T \leq 30$	> 30

Tabela 2 – Classificação de NCT

Fonte: Norma de Manutenção Chesf - NM-MN-SE-S.001, 2019

A partir da leitura e, obedecendo a tabela de classificação de NCT's temos o resultado de uma Não Conformidade Térmica NÍVEL 2 na fase B do disjuntor (Conforme tabela 3). Para esta situação, foi registrado o RIT e aberto uma Nota de Manutenção (NM) número 10598997 para correção urgente da conexão.

FASE	TEMPERATURA(°C)	Delta Comparativo (°C)	Comparativo
A	31	0	Normal
B	65	34	Nível 2
C	33	2	Normal

Tabela 3 – Dados da Leitura

Fonte: Norma de Manutenção Chesf - NM-MN-SE-S.001, 2019

CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho de inspeção termográfica é algo constante, uma vez que as condições climáticas, umidade, poluição atmosférica, maresia, alterações no carregamento da linha, dilatação dos materiais, entre outros fatores, afetam diretamente no comportamento das conexões elétricas. Portanto vale salientar que com o passar do tempo novas NCT's

podem surgir em pontos que antes fora monitorado e tudo mostrava normalidade. Foi possível através deste trabalho perceber a eficiência da inspeção termográfica. A NCT encontrada no circuito de ventilação, caso não tivesse sido detectada e corrigida, poderia indisponibilizar o circuito de ventilação forçada do transformador, ocasionando significativa perda de rendimento. Conseguimos, com o correto uso da inspeção termográfica, o objetivo principal que foi manter a disponibilidade dos equipamentos e aumentar a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15424 – Ensaios não destrutivos – Termografia – Terminologia;

ABNT NBR 15572 – Ensaios não destrutivos – Termografia por infravermelho – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos;

CHESF NM-MN-SE-S.001 – Inspeção Termográfica – Norma de Manutenção;

POSSI, Marcus. Ensaios Termográficos. O Setor Elétrico. São Paulo. Edição 102. Páginas 46-55. julho 2014.

EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE TUCUMÃ POR SOLVENTE UTILIZANDO ETANOL E METANOL

Data de aceite: 01/06/2021

Yanael Lima de Medeiros

Laboratório Multidisciplinar, Campus de
Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade
Federal de Alagoas
Maceió – AL

Mariana Silva Dorta de Melo

Laboratório Multidisciplinar, Campus de
Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade
Federal de Alagoas
Maceió – AL

Amanda Santana Peiter

Laboratório Multidisciplinar, Campus de
Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade
Federal de Alagoas
Maceió – AL

RESUMO: Os biocombustíveis são um tipo de combustível de origem biológica ou natural. Trata-se de uma fonte renovável de energia que é utilizada por meio da queima da biomassa ou de seus derivados, tais como o etanol (álcool para combustível), o biodiesel, o biogás, o óleo vegetal e outros. A maior motivação para o uso de biocombustíveis é seu potencial de reduzir a emissão de gases de efeito estufa de uma forma sustentável. Biodiesel é produzido pela reação entre um óleo vegetal ou gordura animal e um álcool de cadeia curta. Esse óleo vegetal pode ser soja, mamona, dendê, girassol, dentre outros. Tucumã é uma palmeira nativa da Colômbia e de Trinidad ao Brasil, especialmente dos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia

e Roraima. O fruto do tucumã é composto por um caroço lenhoso de cor quase preta, que contém uma amêndoa de massa branca, oleaginosa, bastante dura e recoberta por uma polpa amarelo-alaranjada, de pouca consistência e oleosa. Dois tipos de óleos são produzidos por este fruto: o óleo da polpa externa e o óleo da amêndoa. O óleo vegetal pode ser extraído por prensagem mecânica, por solvente ou ainda pela combinação dos dois. Neste trabalho foi feita a extração do óleo da amêndoa do tucumã utilizando etanol e metanol como solvente, nos tempos de 3h e 5h. O maior teor de óleo extraído foi para a extração com metanol no tempo de 5h, 52,52%.

PALAVRAS-CHAVE: Soxhlet; óleo vegetal; biocombustível.

ABSTRACT: Biofuels are a type of fuel of biological or natural origin. It is a renewable source of energy that is used through the burning of biomass or its derivatives, such as ethanol (alcohol for fuel), biodiesel, biogas, vegetable oil and others. The biggest motivation for the use of biofuels is their potential to reduce greenhouse gas emissions in a sustainable way. Biodiesel is produced by the reaction between a vegetable oil or animal fat and a short-chain alcohol. This vegetable oil can be soybeans, castor oil, palm oil, sunflower, among others. Tucumã is a palm tree native to Colombia and Trinidad to Brazil, especially from the states of Acre, Amazonas, Pará, Rondônia and Roraima. The fruit of the tucumã is composed of a woody stone of an almost black color, which contains an almond of white, oleaginous mass, very hard and covered

by a yellow-orange pulp, of little consistency and oily. Two types of oils are produced by this fruit: the oil of the external pulp and the oil of the almond. Vegetable oil can be extracted by mechanical pressing, by solvent or by a combination of the two. In this work, tucumã almond oil was extracted using ethanol and methanol as solvent, at 3h and 5h. The highest content of extracted oil was for the extraction with methanol in the time of 5h, 52.52%.

KEYWORDS: Soxhlet; vegetable oil; biofuel.

INTRODUÇÃO

A região Amazônica compreende mais de cinquenta por cento do território brasileiro, contando com uma vasta diversidade de fauna e flora. Nesse contexto, existe uma enorme variedade de plantas herbáceas e espécies oleaginosas que possuem diversos fins: alimentícios, medicinais etc. Dentre essas espécies oleaginosas nativas, destaca-se o tucumã do Amazonas (*Astrocaryum aculeatum*) que é uma palmeira que pertence à família Arecacea, cujo mesocarpo é comestível e muito adorado pela população do Estado do Amazonas (LORENZI et al., 2004). É um tipo de carne, de coloração alaranjada, e dentre seus tipos, possui grande quantidade de óleo. Podendo-se obter esse óleo na carne, na amêndoa ou até mesmo na casca do fruto.

O processo convencional de obtenção de óleos vegetais pode ser realizado por prensagem mecânica da matéria-prima e pela extração com n-hexano. Este solvente é inflamável e mais denso que o ar. (SCHWARZBACH, 1997).

A prensa mecânica contínua ou expeller é um método simples e adaptável que permite a instalação em pequenas propriedades e o uso do subproduto (torta) como adubo ou ração animal, que está relacionada ao teor de umidade dos grãos e ao aquecimento (facilita a saída do óleo).

A extração por solvente é uma operação de transferência de massa para retirar o óleo de sementes e/ou polpas oleaginosas. Após terem seu tamanho reduzido, estas sementes são colocadas em contato com o solvente, de maneira que ocorra a transferência do óleo da fase sólida para a fase líquida (PERRY e CHILTON, 1986).

Os óleos vegetais podem ser convertidos a partir de reações de transesterificação com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol), na presença de um catalisador; resultando numa mistura de ésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerina (SCHUCHARDT et al, 1998; MEHER et al., 2006).

Este estudo teve como objetivo extrair óleo da amêndoa do tucumã utilizando prensagem por solvente. As variáveis estudadas foram: tipo de solvente (metanol e etanol) e tempo de extração (3h e 5h). Ao fim de cada extração foi calculada a porcentagem de óleo extraída.

METODOLOGIA

Os experimentos para extração foram realizados no Laboratório Multidisciplinar, localizado no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas. Para extração do óleo da amêndoa do tucumã, Figura 1, primeiramente foi feito o preparo da amostra. Foi retirada a casaca inicialmente e a polpa para chegar na amêndoa. Em seguida a amêndoa foi quebrada e separada em casca e endosperma, de onde foi extraído o óleo.

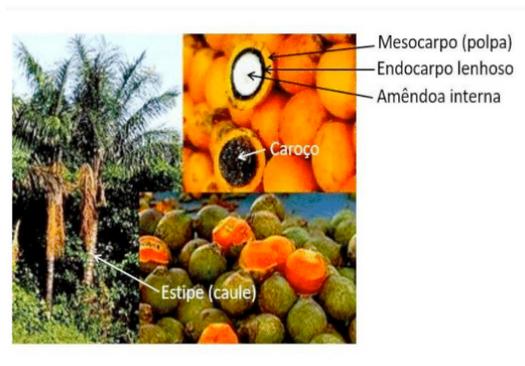


Figura 1. Características do fruto do tucumã

Fonte: KIELING (2018)

Depois da separação da casca do endosperma, este foi colocado na estufa a 45°C por 24h para retirar a umidade, Figura 2.



Figura 2. Amostra retirada da estufa

As amostras foram picadas em pequenos pedaços para facilitar o contato entre a amostra e o solvente. Para a extração por solvente foi feito um planejamento com dois níveis e duas variáveis. As variáveis estudadas foram: tipo de solvente (metanol e etanol) e tempo de extração (3h e 5h), Tabela 1.

Experimento	Tempo (h)	Solvente
1	3	Etanol
2	5	Etanol
3	3	Metanol
4	5	Metanol

Tabela 1. Variáveis estudadas

A amostra foi colocada em um cartucho de papel filtro e pesada para então ser colocada no extrator. A extração foi feita com extrator soxhlet, Figura 3. A chapa foi aquecida com a temperatura de ebulição do solvente que estava contido no balão. O solvente evaporou e ao chegar em contato com o condensador, que estava com circulação de água fria, voltou pro estado líquido caindo no compartimento do extrator que continha o papel filtro com a amostra de onde foi extraído o óleo. O solvente foi extraíndo o óleo e ao chegar no nível da altura do equipamento a miscela (óleo+solvente) voltou para o balão onde inicialmente continha só o solvente e um novo ciclo teve início. Este processo se repetiu até o total de horas determinado para a extração.



Figura 3. Extrator soxhlet

Depois de percorrido o tempo total da extração, o cartucho contendo a amostra foi levado para a estufa para retirar o excesso de solvente e pela diferença da massa no início e da massa ao fim da extração foi possível determinar o teor de óleo extraído, Figura 4.

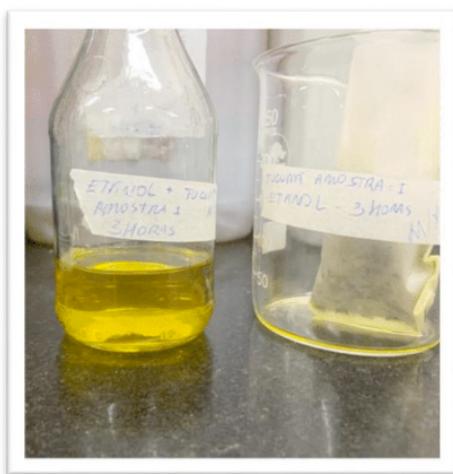


Figura 4. Óleo de tucumã extraído

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados da extração nos 4 experimentos, foi feita a Tabela 2.

Exp.	Tempo (h)	Solvente	Teor de óleo (%)
1	3	Etanol	38,32
2	5	Etanol	45,64
3	3	Metanol	38,51
4	5	Metanol	52,52

Tabela 2. Resultado da extração

Com a tabela 2 foi possível observar que o tempo de extração maior levou a um maior teor de óleo extraído tanto para as extrações com etanol, quanto para as extrações com metanol. No caso do etanol o aumento foi de quase 8% e para o metanol o aumento foi de aproximadamente 15%.

Comparando os tipos de solvente é possível observar que para o tempo de 3h o metanol e o etanol tiveram um teor próximo de óleo extraído, em torno de 38%. Já para o tempo de 5h de extração, o metanol apresentou um melhor desempenho de extração, 52,52% de óleo extraído e o etanol apresentou 45,64% de óleo de tucumã extraído do endosperma.

O óleo extraído pode ser utilizado para a produção de biodiesel. Atualmente a maior quantidade de biodiesel produzida no Brasil é proveniente do óleo de soja, que tem aproximadamente 18% de óleo.

O tucumã pode ser visto como uma alternativa para a produção desse biocombustível, pois além de ter um teor alto de óleo na amêndoa, ainda pode ser utilizado para extração de óleo na polpa.

CONCLUSÃO

O óleo de tucumã apresenta uma maior extração quando é utilizado o metanol como solvente no tempo de 5h, 52,52% de óleo extraído do endosperma.

No fruto de tucumã também pode ser extraído óleo da polpa, o que o torna um fruto promissor para ser utilizado como fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel.

REFERÊNCIAS

KIELING, ANTONIO CLAUDIO. 2018. Viabilidade técnica e econômica da madeira. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

LORENZI, H., SOUZA, H.M., CERQUEIRA, L.S.C.; COSTA, J.T.M.; FERREIRA, E. 2004. Palmeiras Brasileiras e exóticas cultivadas. Instituto Plantarum, Nova Odessa, SP, p. 44., 2004.

MEHER, L.C.; SAGAR, D.V.; NAIK, S.N. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10: 248-268, 2006.

PERRY, R., CHILTON, C.H. Manual de engenharia química. 5a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. 1998. Transesterification of Vegetable Oils: a review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 1998.

SCHWARZBACH, J. Aspectos de segurança relacionados ao hexano na extração de óleos vegetais. *Óleos e Grãos*, São Paulo, Ed. Aspen., mar-abr p. 27-34, 1997.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

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