

ENGENHARIA ELÉTRICA:

COMUNICAÇÃO INTEGRADA
NO UNIVERSO DA ENERGIA

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora

Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

**COMUNICAÇÃO INTEGRADA
NO UNIVERSO DA ENERGIA**

**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. Eloi 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
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. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
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

Prof^a Dr^a Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof^a Dr^a 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

Prof^a Dr^a Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^a Dr^a Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^a Dr^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a Dr^a Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof^a Dr^a 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

Prof^a Dr^a 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

Prof^a Dr^a Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^a Dr^a Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^a Dr^a Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federaci 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

Prof^a Dr^a Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^a Dr^a Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^a Dr^a Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^a Dr^a 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
 Prof^a Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
 Prof^a Dr^a 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
 Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
 Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Prof^a Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^a Dr^a Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
 Prof^a Dr^a Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
 Prof^a Dr^a Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Prof^a Dr^a Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
 Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
 Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
 Prof^a Dr^a Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
 Prof^a Dr^a Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
 Prof^a Dr^a Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
 Prof^a Dr^a 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. Adailson 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
 Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
 Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
 Prof^a Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
 Prof^a Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
 Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
 Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
 Prof^a Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
 Prof^a 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
 Prof^a 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. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Ma. 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. 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 Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
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 Krahel – 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/UFPA
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 Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia 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
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. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
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: comunicação integrada no universo da energia

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremona
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: João Dallamuta
 Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	<p>Engenharia elétrica: comunicação integrada no universo da energia / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-837-3 DOI 10.22533/at.ed.373212302</p> <p>1. Energia. 2. Engenharia. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.1</p>
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

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

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

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 subáreas 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

APLICAÇÃO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL ESPECIALISTA EM RECONHECIMENTO DE TRANSTORNOS VOCAIS MODERADOS

Eduardo Henrique da Silva
Mateus Morikawa
Vinícius Baratieri Suterio
María Eugenia Dajer

DOI 10.22533/at.ed.3732123021

CAPÍTULO 2..... 11

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GROUNDING SYSTEMS MODELING ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

Felipe Vasconcellos
Rafael Alípio
Fernando Moreira

DOI 10.22533/at.ed.3732123022

CAPÍTULO 3..... 25

ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES DE INTERNAÇÃO E DE CONSULTA MÉDICA EM HOSPITAIS PÚBLICOS E PRIVADOS DE ARAPIRACA-AL

Augusto César Lúcio de Oliveira
Gabriel dos Santos Alves
Hapitaglo Rian da Silva
Igor Silva de Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.3732123023

CAPÍTULO 4..... 36

SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM BASE EM SENSORES DE PRESENÇA E BLUETOOTH

Wyctor Fogos da Rocha
Mário Mestria

DOI 10.22533/at.ed.3732123024

CAPÍTULO 5..... 50

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA UM FOTÔMETRO

Gabriela Dias Alba
Alberto Noboru Miyadaira
Oldair Donizeti Leite
Domingos Perego Junior
Eduardo Cezar Lenz
João Pedro de Araújo Nespolo

DOI 10.22533/at.ed.3732123025

CAPÍTULO 6..... 60

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY-DEPENDENT BEHAVIOR OF GROUND

ELECTRICAL PARAMETERS ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

Felipe Vasconcellos

Rafael Alípio

Fernando Moreira

DOI 10.22533/at.ed.3732123026

CAPÍTULO 7..... 77

BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTE DE CONTROLADORES PRIMÁRIOS EM MICRORREDES

João Pedro Magalhães Fernandes

Márcio Stefanello

DOI 10.22533/at.ed.3732123027

CAPÍTULO 8..... 89

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO PADRÃO COM ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE TENSÃO NO MODO TENSÃO-POTÊNCIA ATIVA

Vitor Francisco Bassi de Franchi Siqueira

Romeu Reginatto

DOI 10.22533/at.ed.3732123028

CAPÍTULO 9..... 103

DESENVOLVIMENTO DE UM FOTOMETRO MICROCONTROLADO PARA ANÁLISE DE SUBSTÂNCIAS

Domingos Perego Junior

Alberto Noboru Miyadaira

Oldair Donizeti Leite

Gabriela Dias Alba

Eduardo Cezar Lenz

João Pedro de Araújo Nespolo

DOI 10.22533/at.ed.3732123029

CAPÍTULO 10..... 112

MORTE POR ELETROCUSSÃO NA REGIÃO NORDESTE ENTRE OS ANOS DE 2014 E 2019

Daniela Asquidamini

Carlos A. C. Jousseph

Bruna Pontes Cechinel

DOI 10.22533/at.ed.37321230210

CAPÍTULO 11..... 119

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA GERENCIAMENTO DO CONSUMO RESIDENCIAL DE ENERGIA

Raphael de Aquino Gomes

Vinicius de Mello Lima

Amanda Beatriz Mendanha Fernandes

Charles Lucas Santana de Souza

DOI 10.22533/at.ed.37321230211

CAPÍTULO 12.....	131
ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO ESTÁGIO DE SAÍDA DE UM GERADOR DE ONDAS ARBITRÁRIAS	
Daiany Besen	
Felipe Walter Dafico Pfrimer	
Alberto Yoshihiro Nakano	
DOI 10.22533/at.ed.37321230212	
CAPÍTULO 13.....	140
DESENVOLVIMENTO DE PLACA DE AQUISIÇÃO E ELETRODOS SECOS EM ELETROMIOGRAFIA	
Luiz Augusto Garonce Ferreira	
Felipe Walter Dafico Pfrimer	
Alberto Yoshihiro Nakano	
DOI 10.22533/at.ed.37321230213	
CAPÍTULO 14.....	148
PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UM CURSO DE OPERADOR DE USINAS TERMELÉTRICAS ARTICULADO COM EMPRESAS DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM	
Marcel Ribeiro Mendonça	
Marcilia Maria Soares Barbosa Macedo	
DOI 10.22533/at.ed.37321230214	
CAPÍTULO 15.....	159
DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE ANÁLISE DE AZEITES E ÓLEO VEGETAL DE BAIXO CUSTO	
Matheus Bogo Polidorio	
Alexandre de Sousa Duarte	
Alberto Yoshihiro Nakano	
Ricardo Schneider	
Felipe Walter Dafico Pfrimer	
DOI 10.22533/at.ed.37321230215	
SOBRE OS ORGANIZADORES	170
ÍNDICE REMISSIVO.....	171

CAPÍTULO 1

APLICAÇÃO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL ESPECIALISTA EM RECONHECIMENTO DE TRANSTORNOS VOCAIS MODERADOS

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 05/01/2020

Eduardo Henrique da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/6756792943255152>

Mateus Morikawa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/4261160874062010>

Vinícius Baratieri Suterio

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/0642452489289061>

María Eugenia Dajer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/8423481649170942>

RESUMO: A voz é um elemento primordial para a realização de grande parte das atividades feitas pelos seres humanos, sejam elas do âmbito de lazer ou de trabalho. Distúrbios vocais ocorrem em um número elevado de pessoas, e podem ser causados por diversos motivos, sendo assim, tem-se como necessário um diagnóstico rápido e eficiente para o seu devido tratamento. O objetivo desse trabalho foi realizar o reconhecimento de desvios vocais de grau moderado por meio da aplicação de uma rede neural artificial especialista. Para a sua devida execução, foram

realizadas diferentes etapas, sendo elas: o tratamento do banco de dados utilizado; o pré-processamento dos sinais de voz; a extração das características da voz (energia e entropia) por meio da Transformada Wavelet Packet, e, por fim, a aplicação da rede neural artificial especialista, na qual foram realizados treinamentos e testes. Foi possível obter uma taxa de acerto total de 82,2% utilizando a energia extraída dos sinais de voz, ao mesmo tempo que, utilizando a entropia, foi obtida uma taxa de 99,5% de acerto.

PALAVRAS-CHAVE: Distúrbios da voz. Transformada Wavelet Packet. Perceptron Multicamadas.

APPLICATION OF AN ARTIFICIAL SPECIALIST NEURAL NETWORK FOR THE RECOGNITION OF MODERATE VOCAL DISORDERS

ABSTRACT: The voice is a key element for the accomplishment of most of the activities done by human beings, whether recreation or work. Vocal disorders occur in a large number of people and can be caused by several reasons, so a fast and efficient diagnosis is necessary for its proper treatment. The objective of this study was to recognize moderate vocal disorders by the application of a specialized artificial neural network. For its proper implementation, certain steps were required, namely: the database treatment used; preprocessing of voice signals; the extraction of voice characteristics (energy and entropy) using the Wavelet Packet Transform, and, finally, the application of the specialist artificial neural network. It was possible to achieve a total hit rate of 82.2% using the energy

extracted from the signals while using entropy, a 99.5% accuracy rate was obtained.

KEYWORDS: Voice disorders. Wavelet Packet Transform. Perceptron Multilayer.

1 | INTRODUÇÃO

A voz é um elemento primordial para grande maioria das atividades realizadas pelos seres humanos, seja durante o trabalho, ou durante as horas de lazer, utilizada em grandes e pequenas proporções no cotidiano das pessoas, sendo assim, o meio de comunicação mais utilizado do mundo. A voz é uma característica própria do indivíduo, que pode até mesmo informar as condições de saúde, de idade, de sexo, do estado emocional e de traços da personalidade do indivíduo [BEHLAU, 2001].

A produção da voz está relacionada a fatores biológicos e genéticos, mas também culturais e psicossociais. Além disso, a personalidade, o estado emocional e a forma de expressar as emoções também diferenciam a voz. De maneira geral pode-se dizer que a produção do som é consequência da força muscular das pregas vocais e da pressão que o ar sai do pulmão [GAYOTTO, 2006] [GOULART, 2002].

A partir do conceito de qualidade vocal, a voz pode ser classificada como eufonia ou como disfonia. Uma voz saudável é denominada eufônica, sendo aquela onde há o equilíbrio entre a força do ar e da musculatura das pregas vocais, quando falta esse equilíbrio, a voz é considerada disfônica. Pode-se entender como disfonia qualquer tipo de dificuldade na emissão vocal que impeça a voz de cumprir o seu papel básico de transmissão da mensagem verbal e emocional de um indivíduo [PENTEADO, 2006] [BATALLA, 2004].

Analisar auditivamente a qualidade vocal de um indivíduo não é uma tarefa fácil, pois há muitas variações na voz em uma mesma emissão, o que torna complexa sua análise. Além disso, os indivíduos geralmente apresentam desvios vocais combinados, como rugosidade e sopro, rugosidade e tensão, ou esses três simultaneamente, o que confunde o avaliador e interfere na concordância do julgamento perceptivo [BELE, 2005] [OATES, 2009].

Portanto, para auxiliar os profissionais da área em questão, é possível utilizar ferramentas que possam auxiliar no reconhecimento de disfonias em indivíduos, por meio de processos computacionais desenvolvidos em base de um banco de dados confiável, fazendo uso assim da área da Engenharia Biomédica. A voz é um sinal biológico que pode ser representado como uma função que contém informações que são obtidas através de sensores ou transdutores. Essas informações evidenciam o comportamento ou natureza de um fenômeno e podem ser processadas ou transmitidas [WEEKS, 2012] [OPPENHEIM, 2010].

Uma das etapas essenciais para a extração de características dos sinais de voz é a aplicação da Transformada Wavelet Packet. Esta ferramenta permite analisar eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contenham potências não-estacionárias

em diferentes frequências, sendo assim de grande utilidade para a análise de sinais de voz [GUIMARÃES, 2003].

A representação da voz como um sinal é essencial para a realização do processamento digital dela, pois este sinal será aplicado posteriormente em uma ferramenta computacional (redes neurais artificiais), para a realização do reconhecimento de padrões. As RNAs são modelos computacionais inspirados no processo de aprendizagem do cérebro humano, emulando o seu funcionamento. Possuem neurônios artificiais que passam por um determinado processo de aprendizagem, sendo treinados e testados para realizar uma tarefa ou uma função específica. O processo de aprendizagem é realizado através do treinamento da RNA, na qual os pesos sinápticos acumulam o conhecimento adquirido durante o processo [HAYKIN, 2001].

As RNAs empregam uma interligação maciça de células computacionais simples denominadas “neurônios” ou “unidades de processamento”, sendo assim, o conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente por intermédio de um processo de aprendizagem, os pesos sinápticos são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido [HAYKIN, 2001].

O resultado produzido por um neurônio artificial pode ser representado pelas equações (1) e (2):

$$u = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta \quad (1)$$

$$y = g(u) \quad (2)$$

Sendo x_i os sinais de entrada, que representarão os valores assumidos pelas variáveis de entrada de uma aplicação em específico; w_i os pesos sinápticos, que serão ponderados de acordo com os valores de entrada e com a saída desejada da rede neural; θ o limiar de ativação, que especificará o patamar apropriado para gerar um valor de disparo na saída do neurônio; u o potencial de ativação, valor mínimo para que o neurônio produza um potencial excitatório; $g(u)$ a função de ativação, que limitará a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores razoáveis a serem assumidos pela sua própria imagem funcional e, por fim, y o sinal saída, que consiste no valor final produzido pelo neurônio [SILVA, 2010].

Existem diversos tipos de arquiteturas de RNAs, neste trabalho foi utilizada a arquitetura *feedforward* de camadas múltiplas (Perceptron Multicamadas). Existem também diferentes tipos de redes neurais e processos de aprendizagem, no caso, foram utilizados uma RNA especialista, que é um tipo de RNA capacitada especificamente para reconhecimento de padrões, e o treinamento supervisionado, vistos como mais efetivos para este tipo de aplicação [SILVA, 2010].

O objetivo geral do trabalho é utilizar uma rede neural artificial especialista para o reconhecimento de disfonias de grau moderado. As etapas da execução da pesquisa foram as seguintes:

- Tratamento e verificação do banco de dados, a fim de garantir que os áudios necessários para a realização do trabalho estão presentes e em boas condições.
- Pré-processamento dos sinais de voz;
- Extração das características dos sinais de voz;
- Treinamento e teste da rede neural especialista;
- Validação da rede neural especialista aplicada para reconhecer transtornos vocais de nível moderado.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Banco de Dados

A realização do trabalho só foi possível em razão da obtenção do banco de dados de vozes, que foi cedido gentilmente pela Dra. Fabiana Zambon do Sindicato de Professores Privados de São Paulo SINPRO-SP. O banco de dados em questão continha um total de 75 áudios, com gravação da vogal /e/ sustentada, tendo uma diversidade de vozes eufônicas (saudáveis) e disfônicas de grau leve, moderado e intenso.

Porém, os áudios não estavam classificados separadamente no banco de dados, portanto, foi necessário utilizar o método descrito por Yamasaki (2016) para a devida classificação dos áudios em eufônicos, disfônicos de grau leve, de grau moderado e de grau intenso.

Após a classificação dos áudios, foi possível observar a quantidade de áudios pertencentes à cada grupo, como descrito na Tabela 1.

	Saudáveis	Grau Leve	Grau Moderado	Grau Intenso
Quantidade de áudios	25	29	20	1

Tabela 1 – Representação da quantidade de áudios pertencentes à cada grupo.

Com os áudios devidamente separados, teve início a etapa de pré-processamento dos sinais de voz. Esta etapa, e todas as outras subsequentes, foram realizadas utilizando o software MATLAB®, assim como, exclusivamente para esta etapa, foi utilizado o software *Audacity*.

2.2 Pré-processamentos dos sinais de voz

Esta etapa do trabalho foi dividida em 3 tarefas consecutivas, são elas:

- Remoção de silêncio;
- Remoção de sinal DC *offset*;

- Remoção de artefatos.

Um detalhe importante nesta etapa do trabalho é o fato de que características relevantes para a classificação da qualidade vocal podem ser ruídos, o que praticamente impossibilita a aplicação de filtros [LIMA, 2018].

A remoção de silêncio consistiu em retirar todos os trechos nos áudios nos quais ocorre silêncio, mantendo assim somente os trechos nos quais ocorre a vogal /e/ sustentada. Esse processo foi realizado a partir da construção de uma rotina no software MATLAB®.

Logo após, foi removido o sinal DC *offset*, sinal contínuo e de baixa frequência, que se encontra presente nos áudios. Esse sinal é proveniente dos componentes eletrônicos utilizados para a gravação das vozes, e é prejudicial para o bom funcionamento da RNA se não for removido. Para detectar e remover este tipo de sinal foi utilizada a função *detrend* presente na biblioteca de funções do software MATLAB®.

As Figuras 1 e 2 mostram um dos áudios presentes no banco de dados antes e depois do processo de remoção de silêncio e de sinal DC *offset*, respectivamente.

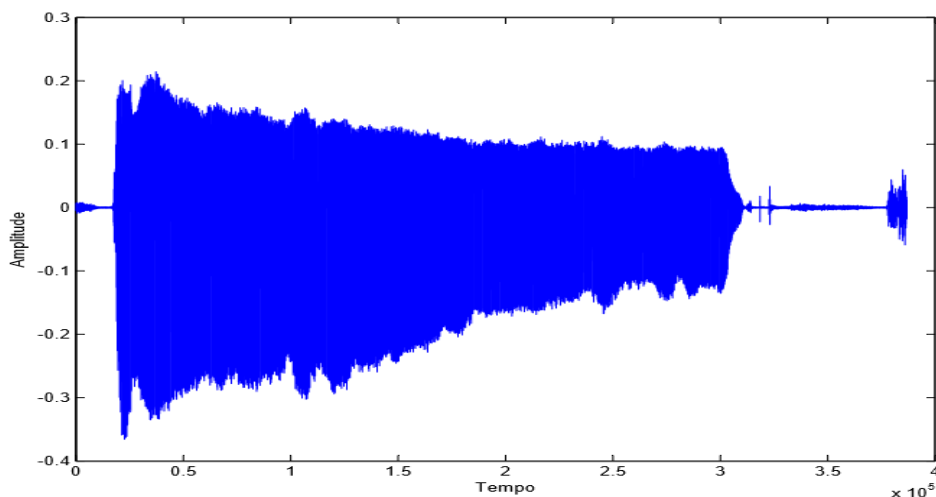


Figura 1 – Áudio antes do processo de remoção do silêncio e do sinal DC *offset*.

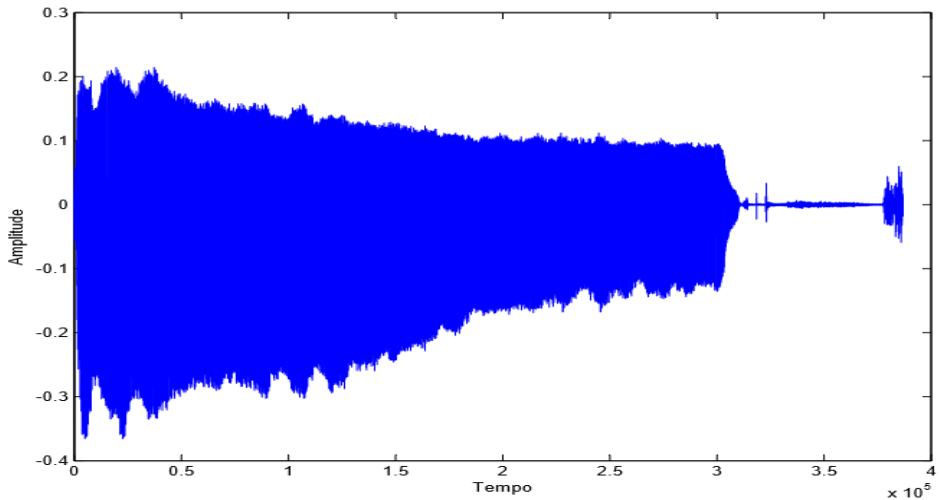


Figura 2 – Áudio depois do processo de remoção do silêncio de do sinal DC *offset*.

Para a remoção de possíveis artefatos presentes nos áudios foi utilizado o software *Audacity*. Um artefato pode ser definido como um trecho do áudio que possua qualquer tipo de som que não seja a vogal /e/ sustentada, como tosses, risadas, entre outros. Esta etapa é de extrema importância, pois, a não remoção deste tipo de elementos podem introduzir dados errôneos na RNA que podem causar a diminuição de assertividade no reconhecimento de padrões e classificação dos sinais. Os artefatos foram removidos manualmente.

Feitas todas as etapas citadas, o pré-processamento dos sinais de voz foi encerrado, começando assim a etapa de extração das características dos sinais de voz. Antes do início do processo de extração de características, foi realizada uma separação dos áudios a serem utilizados. Para isso, foram utilizados todos os áudios do grupo de disfonias de grau moderado e apenas 11 áudios do grupo saudável. Os áudios pertencentes ao grupo disfonias de grau leve e ao grupo de disfonias de grau intenso não foram utilizados, por não serem o foco do trabalho.

2.3 Extração das características

Após a separação entre os áudios que foram utilizados nas etapas a seguir, foi iniciado o processo de extração de características, o qual teve como primeira tarefa a concatenação de todos os áudios, para que fosse realizada a normalização por meio da função *mapminmax*, presente na biblioteca do software MATLAB.

Com os áudios separados novamente, foi realizado um *overlap* (sobreposição) de 50% nos áudios, totalizando 7100 amostras e separando-as em uma porção para treinamento e outra para teste da RNA. Foram separadas aleatoriamente 5680 amostras para treinamento e 1420 para teste. Com as amostras já separadas para treinamento e

teste, e com sobreposição de 50% realizada, foi aplicada a TWP da Família Daubechies 2, com 5 níveis de decomposição e janelamento de 4096 amostras, escolhas feitas a partir da classificação feita por Lima (2018). A TWP foi aplicada para extrair a energia e a entropia das amostras, a partir das funções *wenergy* e *wentropy*, presentes na biblioteca do software MATLAB.

Em seguida, as matrizes de energia e entropia das amostras de treinamento e teste obtidas pela TWP foram normalizadas levando em conta a função de ativação a ser utilizada na RNA, que no caso foi a logística [SILVA, 2010].

2.4 Aplicação da rede neural especialista

Sendo assim, foi possível iniciar o processo de treinamento e teste da RNA especialista. A saída da RNA foi construída com a resposta à disfonia de grau moderado representada pelo vetor [1 0], enquanto a resposta ao grupo saudável pelo vetor [0 1]. As características fixadas da RNA especialista estão descritas na Tabela 2.

Taxa de Aprendizagem	0.2
Épocas	200
Algoritmo de Aprendizagem	Levenberg-Marquardt
Função de Ativação (intermediária)	Logística
Função de Ativação (saída)	Rampa Linear

Tabela 2 – Características da rede neural especialista utilizada.

O número de camadas intermediárias da rede neural, assim como a quantidade de neurônios em cada camada foram valores não fixados, a fim de poder alcançar a maior taxa de acerto possível utilizando diferentes combinações dos mesmos.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram utilizadas 720 amostras do grupo disfônico de grau moderado e 700 amostras do grupo eufônico (saudável), totalizando 1420 amostras de teste. Após a realização de 20 testes com diferentes topologias da RNA, utilizando um grau de confiabilidade de 98%, foi possível identificar o tipo de topologia mais efetivo, a utilização de apenas uma camada intermediária, contendo 2 neurônios artificiais.

A partir da topologia citada acima, foram coletados os resultados da RNA após realizar o treinamento e teste por 10 vezes, utilizando tanto os valores de energia, mostrados na Tabela 3, como os de entropia, mostrados na Tabela 4. Pode-se observar pela tabela 4, que foi obtida uma taxa de acerto total maior quando utilizada a entropia, extraída dos sinais de áudio pela TWP, com o resultado “Média” sendo a média entre os 10 resultados obtidos.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
93,03 %	81,83 %	88,38 %	84,51 %	77,89 %	81,34 %	79,08 %	77,05 %	79,08 %	80,64 %	82,28 %

Tabela 3 – Resultados obtidos com a energia.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
99,86 %	99,65 %	99,85 %	99,86 %	99,86 %	97,11 %	99,85 %	99,86 %	99,86 %	99,8 %	99,56 %

Tabela 4 – Resultados obtidos com a entropia.

As Tabelas 5 e 6 mostram as matrizes de confusão obtidas a partir do valor médio de acerto, da entropia e da energia, respectivamente.

	Disfonias de Grau Moderado	Vozes Saudáveis	Incerteza
Disfonias de Grau Moderado	98,90%	0,04%	1,06%
Vozes Saudáveis	31,38%	65,22%	3,40%

Tabela 5 – Matriz confusão da média dos resultados obtidos com a energia.

	Disfonias de Grau Moderado	Vozes Saudáveis	Incerteza
Disfonias de Grau Moderado	99,58%	0,10%	0,32%
Vozes Saudáveis	0%	99,54%	0,46%

Tabela 6 - Matriz confusão da média dos resultados obtidos com a entropia.

É possível analisar, a partir da matriz confusão dos valores obtidos com a energia, que a RNA obteve um rendimento satisfatório na identificação das amostras pertencentes ao grupo disfônico de grau moderado, porém, teve rendimento um pouco menor na identificação das amostras do grupo saudável, obtendo um erro maior na classificação desse grupo. Este fato pode ser justificado por uma adaptação não tão boa ao grupo em questão, que pode ser explicado pela menor quantidade de áudios do grupo em questão presente no banco de dados, para treinamento da RNA.

Ao mesmo tempo que, pela matriz de confusão dos valores obtidos com a entropia, percebe-se um rendimento satisfatório tanto na identificação das amostras do grupo disfônico de grau moderado, como das amostras do grupo saudável, mostrando assim uma melhor adaptação da RNA, e comprovando um melhor rendimento desta, em geral, quando

é utilizada a entropia.

4 | CONCLUSÃO

Com os resultados da RNA especialista, foi possível notar que o método de pré-processamento dos sinais de voz em conjunto à extração das características desses sinais a partir da TWP, mostraram-se efetivos para essa aplicação. Nota-se também a eficiência da RNA como uma ferramenta de reconhecimento de transtornos vocais de grau moderado, pois os resultados obtidos após o treinamento e o teste foram satisfatórios, tendo um grau de confiabilidade alto para a aplicação. Confiabilidade, necessária para ferramentas de auxílio diagnóstico.

Portanto, após todos os procedimentos realizados, desde a verificação e tratamento do banco de dados utilizado, até o treinamento e teste da RNA especialista, os objetivos relacionados à execução do trabalho puderam ser cumpridos satisfatoriamente.

REFERÊNCIAS

Batalla, F, N; Santos, P, C; Nieto, C, S; González, B, S; Sequeiros, G. **Evaluación perceptual de la disfonía: correlación con los parámetros acústicos y fi nalidad**. Acta Otorrinolaringol. Espanha, 55(6), 2004, p:282-7.

Behlau, M; Azevedo, R; Pontes, P. **Conceito de voz normal e classificação das disfonias**. Voz: o livro do especialista. Rio de Janeiro: Revinter, v.1, 2001. p.53-79.

Bele, I. **Reliability in Perceptual analysis of voice quality**. J Voice, 19(4), 2005, p:55-73.

Gayotto, L, C. **Dinâmicas de Movimento da Voz**. Revista Distúrbios da Comunicação, v. 17, n. 3, 2006, p.41-49.

Goulart, D; Cooper, M. **Por todo o canto**. São Paulo: G4, v.1, 2002.

Guimarães, C, A, S; Freire, P, K, M; Torrence, C. **A Transformada Wavelet e sua Aplicação na Análise de Séries Hidrológicas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.18, n.3, 2003, p. 271-280.

Haykin, Simon. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. 2ª. ed. Hamilton, Ontario, Canadá. Goodman, 2001.

Lima, A. A. M. **Classificação de Disfonias Utilizando Redes Neurais Artificiais e Transformadas Wavelet Packet**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, 2018.

Oates J. **Auditory-perceptual evaluation of disordered vocal quality – pros, cons and future directions**. Folia Phoniatr Logop, 61(1), 2009, p.49-56.

Oppenheim, A, V; Schafer, R, W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2010.

Penteado, R, Z; Pereira, I, M, T, B. **Avaliação do impacto da voz na qualidade de vida de professores**. Revista Soc. Bras. Fonoaudiol, 2(2), 2006, p.19-28.

Silva, I. Spatti, D. H. Flauzino, R. A. **Redes Neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2010.

Weeks, M. **Processamento Digital de Sinais: Utilizando Matlab e Wavelets**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Yamasaki, R; Madazio, G; Leão, S, H, S; Padovani, M; Azevedo, R; Behlau, M. **Auditory-perceptual Evaluation of Normal and Dysphonic Voices Using the Voice Deviation Scale**. Journal of Voice. Auckland, v.31, n.1, 2016, p.67-71.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GROUNDING SYSTEMS MODELING ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 29/01/2021

Felipe Vasconcellos

Department of Electrical and Computer
Engineering of Federal University of Bahia
(UFBA)
<http://lattes.cnpq.br/0508094462424211>

Rafael Alípio

Department of Electrical Engineering of Federal
Center of Technological Education of Minas
Gerais (CEFET-MG)
<http://lattes.cnpq.br/6715701375569983>

Fernando Moreira

Department of Electrical and Computer
Engineering of Federal University of Bahia
(UFBA)
<http://lattes.cnpq.br/8068628216980918>

ABSTRACT: This paper investigates the impact of grounding systems modeling on the lightning performance of overhead transmission lines. The developed overvoltages through the insulator string and the backflashover rates of a Brazilian 138-kV transmission line are estimated, while the tower-footing grounding system is represented by three different models, namely: i) a static model, consisting of a lumped resistance with value equal to the low-frequency grounding resistance, ii) a full-wave wideband model (as known as HEM – Hybrid Electromagnetic Model), and iii) a pi-cascade wideband model. Taking as reference the results, it is shown that the static model can lead

to errors and incorrect predictions of insulation breakdown. Concerning to the wideband models, HEM unquestionably produces the most precise results, but based on the results of this work, it is shown that the pi-cascade model is relatively accurate, with the advantage of requiring much less computational effort and simulation time, which makes it attractive for applications where this feature is important, such as probabilistic analysis (based on numerous simulations) and/or Engineering applications.

KEYWORDS: Transmission lines; grounding systems, frequency-dependent soil electrical parameters, lightning performance, backflashover.

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MODELAGEM DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO SOBRE O DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

RESUMO: Este artigo investiga o impacto da modelagem de sistemas de aterramento no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. As sobretensões desenvolvidas através da cadeia isolante e as taxas de desligamento por backflashover de uma linha de transmissão de 138 kV brasileira são estimadas, enquanto o sistema de aterramento do pé de torre é representado por três modelos diferentes, a saber: i) um modelo estático, consistindo de uma resistência de concentrada com valor igual à resistência de aterramento de baixa frequência, ii) um modelo de banda larga de onda completa (como conhecido como HEM - Hybrid Electromagnetic Model), e iii) um modelo

de banda larga em cascata de pi. Tomando como referência os resultados, é mostrado que o modelo estático pode levar a erros e previsões incorretas de ruptura do isolamento. Com relação aos modelos de banda larga, o HEM produz inquestionavelmente os resultados mais precisos, mas com base nos resultados deste trabalho, mostra-se que o modelo de cascata de pi é relativamente preciso, com a vantagem de exigir muito menos esforço computacional e tempo de simulação, o que o torna atrativo para aplicações onde esta característica é importante, tais como análises probabilísticas (baseada em numerosas simulações) e/ou aplicações de Engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Linhas de transmissão, sistemas de aterramento, parâmetros elétricos de solo dependentes da frequência, performance frente a descargas atmosféricas, backflashover.

1 | INTRODUCTION

Direct lightning strikes to the transmission line towers or to the shielding wires can result in severe overvoltages across insulators leading to line outages. Backflashover events are mostly responsible for lightning-related outages of lines below 500 kV installed in regions within soil resistivity from moderate to high [1, 2].

Inside the scientific community, the discussion concerning the most effective approach for modelling grounding systems remains an open issue and electromagnetic field theory (EMF) or transmission line models (with lumped or distributed parameters) are yet both popularly used. Undoubtedly, EMF theory models produces the most precise results, while transmission line models are strongly constrained by low frequency quasi-static approximations. Otherwise, EMF models implementation could become complicated and time consuming when grounding systems have complex and/or realistic geometry. On the other hand, the transmission line models, when carefully applied, allows an easier implementation on commercially (or even free) available software for electromagnetic transient analysis. The need to use adequate models for the frequency content of the studied phenomena is an important factor that should be considered for simulating electromagnetic transients [3].

Traditionally, the lightning performance of transmission lines is evaluated using the broadly accepted time-domain electromagnetic transient tools (ATP-EMTP, EMTP-RV, and PSCAD), due to their effectiveness to handle with complex networks and diversified system apparatus [4, 5]. Nevertheless, there is no model that consider the frequency-dependent behavior of the grounding system inherent to these time-domain tools, and consequently, it is often modelled as a simple lumped resistance [6]. This simplification overestimates results which do not are consistent with values found experimentally [7][8][9]. A possibility to improve these results is to determine the grounding system response in the frequency domain for the frequency range of the transient study and then use a rational approximation which reproduces the frequency response of the grounding systems through a synthesized R-L-C equivalent circuit [10].

Additionally, the soil permittivity and conductivity highly vary along the typical frequency range of lightning currents, being this effect not included in the aforementioned time-domain tools [11]. Recent works show that such frequency-dependent behavior of soil parameters greatly impacts the lightning performance of grounding systems [8, 12, 13].

Within this context, this work aims to investigate the impact of grounding systems modeling on the lightning performance of overhead transmission lines, and to evaluate the applicability of each representation. The paper is organized as follows: section 2 describes the methodology and system description; the modeling guidelines are presented in section 3; simulation results and analysis are shown in section 4; and the main conclusions on this work are related in section 5.

2 | METHODOLOGY AND SYSTEM DESCRIPTION

To evaluate the influence of grounding systems modeling on the lightning performance of transmission lines in areas with high soil resistivity, a 138-kV Brazilian transmission line is considered (CFO = 650 kV).

The incidence of lightning strikes to the top of a transmission tower is simulated. Two adjacent towers (identical to the stricken one) are included in the simulations to consider the effect of wave propagation along the line conductors and also the reflections from the adjacent towers and its grounding systems. Two spans of 400 m long each are considered at each side of the striking point. The lines after each adjacent tower are sufficiently long to avoid reflections.

Figure 1 illustrates the typical tower silhouette, designed with one ACSR conductor per phase (LINNET) and one 3/8" EHS shield wire. The coordinates of the line cables (in meters) are indicated in the same figure (values within parenthesis are midspan heights).

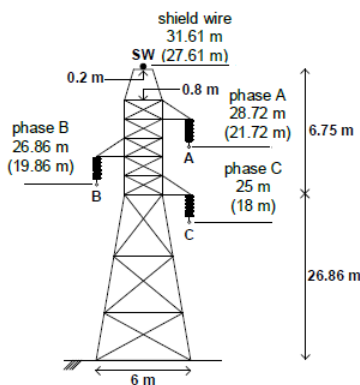


Fig. 1. Typical tower silhouette.

The typical grounding system design of the transmission line towers is depicted in Fig. 2. It contains four counterpoise cables of 7 mm radius and buried 0.5 m deep in the soil.

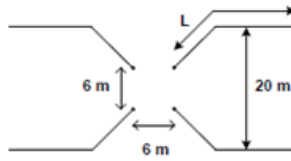


Fig. 2. Typical arrangement of tower's grounding systems.

The length (L) of the counterpoise cables is set according to the low-frequency soil resistivity ρ_0 , as indicated in Table I. It is worth mentioning that the length of the cable is established by the effective length for first strokes and also considering local engineering practices.

ρ ($\Omega \cdot m$)	1,000	3,000	5,000	10,000
L (m)	40	60	80	130

Table I - Counterpoise cable length according to soil resistivity

The Disruptive Effect (DE) Method is applied to check the occurrence of insulation breakdown. The conception of the DE method is based on the idea that there exists a base disruptive effect (DE_B) for each specific insulation configuration. If a nonstandard surge exceeds this base DE_B , it is considered that flashover occurs. On the other hand, if the surge is less than this base DE_B , it is assumed that no flashover occurs [14].

The general equation for the disruptive effect is

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (1)$$

where $e(t)$ is the voltage across the insulator. For a typical 138-kV line, the constants of the DE method are: $DE_B = 1.1506(CFO)^k$; $k = 1.36$; $V_0/CFO = 0.770$ [14].

The simulations presented in this work were performed using ATP/EMTP. The advantage of using this type of tool is its low computational effort associated with adequate precision, especially when it comes to engineering applications [15].

The modeling guidelines of the simulated power system is then briefly described.

3 | MODELING GUIDELINES

3.1 Lightning current waveform

A proper evaluation of lightning effects on power systems relies upon, among other factors, on an appropriate representation of the lightning current waveform since the quality of the simulation results depends on the representativity of the assumed lightning current waves [16].

According to [17], the first stroke currents are characterized by a pronounced concavity at the front and by the occurrence of multiple peaks, being the second peak usually the highest one, and the maximum steepness occurring near the first peak according to measurements of instrumented towers, such as those presented in [18,19].

Considering the previous aspects, the simulations were performed considering some brazilian conditions, as the current waveform depicted in fig. 3, that approximately reproduces the main median parameters of first strokes measured at morro do cachimbo station. As detailed in [20], the waveform of fig. 3 is obtained by a sum of Heidler functions.

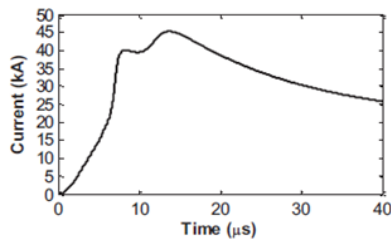


Fig. 3. Representative lightning current waveform of first strokes measured at Morro do Cachimbo Station.

3.2 Phase cables and shield wire

The phase cables and shield wire are modeled using the lcc tool of atp [9], that includes the well-known line constants and cable constants routines. In lcc, the cables and shield wire positions are set in accordance with the tower silhouette, as shown in fig. 1, and the frequency-dependent line model JMARTI is used [21].

3.3 Transmission line tower

the transmission tower is modeled as a lossless single-phase transmission line, and its surge impedance is calculated using the revised Jordan's formula, that was extended in [22] to consider vertical multiconductor systems. Assuming that the tower can be represented by n vertical conductors that are connected at the same current injection point, it is possible to model the whole multiconductor system as a single transmission line with equivalent

surge impedance Z_{eq} given by [22]

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \dots + Z_{1n}}{n} \quad (2)$$

where

$$Z = 60 \left[\ln \frac{4h}{r} - 1 \right] \quad (3)$$

and

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (4)$$

In (2) and (3), h is the height of the conductor, r is the conductor radius, and d_{ij} corresponds to the distance between the center of the conductors i and j . Particularly, the tower of Fig. 1 was sectioned in four segments, each one represented by four vertical conductors. The lower part of the tower was represented as a cascade of three transmission lines (two of 9 m and one of 8.86 m), while its upper part was represented as a single 6.75-m long transmission line. This was made to consider the variation of the cross section of the tower with position, which changes the mutual surge impedance as a function of height. The equivalent impedance of each tower section was computed using (1), (2) and (3), considering the average distances between tower conductors and assuming $r = 6.5$ cm. The propagation speed of the surge wave was assumed to be 80% of speed of light, as in [22]. The final tower model is illustrated in Fig. 4.

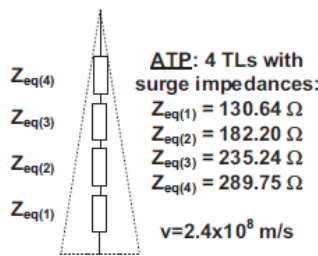


Fig. 4. Transmission tower representation.

3.4 Tower-footing grounding

The tower-footing grounding system is represented by three different models:

- I. **Static model (STM):** a simple resistor of value equal to the low-frequency grounding resistance of the tower-footing grounding system is connected to the base of the transmission towers.
- II. **Full-wave and iii) pi-cascade (PIM) wideband model:** an equivalent circuit

that contemplates the wideband response of the tower-footing grounding system is connected to the base of the transmission towers.

In ii) the tower-footing ground harmonic impedance $Z(j\omega)$ is computed applying the Hybrid Electromagnetic Model (HEM) [23], based on the Full-Wave Maxwell Equations and validated from experimental results. This model is acknowledged as a benchmark for its accuracy.

In iii) the tower-footing ground harmonic impedance $Z(j\omega)$ is computed applying an adapted pi-cascade model [24], based on transmission line theory. An adaptation of the original model was made, in which the internal resistance of the cable was neglected, as it is insignificant in relation to the grounding impedance, as the counterpoise cables are manufactured using conductive material.

Grounding conductors are characterised by a series inductance L , a shunt conductance G and a shunt capacitance C . They can be modelled as series connected pi-equivalent circuits with lumped R-L-C elements, based on the well-known Sunde's expressions, where each pi-circuit corresponds to a small conductor segment (Fig.5) [24].

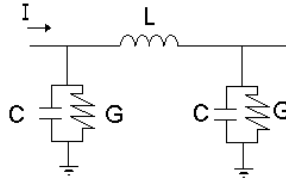


Fig. 5. Pi-equivalent circuit. Adapted from [24].

The frequency-dependent behaviour of the electrical soil parameters was included considering the rigorous causal model proposed by Alipio and Visacro [7], which is based on a large number of soil parameter measurements performed in field conditions [25]-[26]. After the computation of the harmonic impedance $Z(j\omega)$, a pole-residue model, given by eq. (4), of the associated admittance $Y(j\omega) = 1/Z(j\omega)$ is acquired using the Vector Fitting (VF) method [10]. In the end, from the acquired passive pole-residue model of the grounding admittance, it is possible to synthesize an electrical circuit, which can be included directly in time-domain simulations.

$$Y(s = j\omega) \cong Y_{fit}(s = j\omega) = \sum_{m=1}^N \frac{r_m}{s - a_m} + d + se \quad (5)$$

In (4), a_m and r_m , respectively, express the poles and residues of the pole-residue approximation I_{fit} , while d and e are constant real values, and N is the number of poles (order of the pole-residue model). To achieve stable time-domain simulations, the passivity

is enforced by perturbation of the model parameters [27]. It is relevant to mention that both pole-residue model and electrical circuits were achieved applying the public domain calculation package for a rational approximation of frequency-dependent admittance matrices available in [28].

4 I RESULTS AND ANALYSIS

To assess the impact of the grounding systems modeling in terms of the lightning performance of the transmission lines, the following cases were simulated: i) static model (STM); ii) full-wave wideband model (HEM); iii) pi-cascade wideband model (PIM). Four values of soil resistivity were considered (1,000; 3,000; 5,000; and 10,000 $\Omega.m$), and the corresponding lengths of counterpoise are indicated in Table I.

The developed overvoltages waves and peak values are presented in subsection 4.1. The outage rates of the lines considering uniform and non-uniform distribution of soil resistivities along the transmission line are shown in subsection 4.2.

4.1 Developed overvoltages

The overvoltages developed through the upper insulator string (phase A) of the 138 kV line due to the incidence of a lightning strike at the top of the tower are shown in Fig. 6. It was decided to present only the graphs and values corresponding to phase A because it was the phase that presented the highest overvoltage values in all the cases studied, thus being the most relevant for the lightning performance and outage rates evaluation, besides providing a less polluted graphical representation.

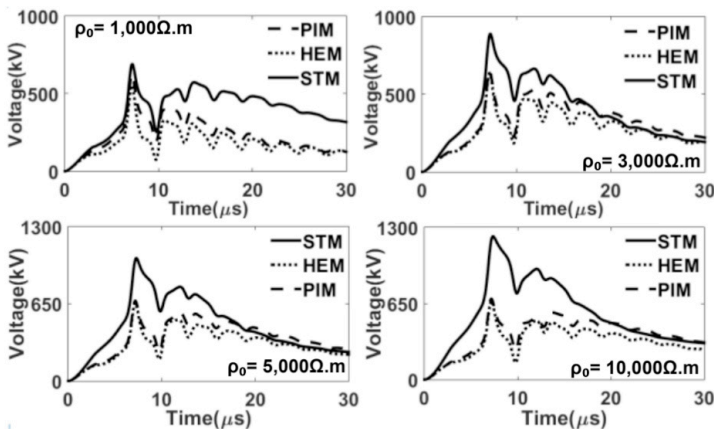


Fig. 6. Resultant Overvoltage waves of phase A (upper) for soil resistivity values from 1,000 $\Omega.m$ to 10,000 $\Omega.m$.

ρ	L	STM	HEM	PIM	Δ	∂
1,000	40	621	554	572	12.1%	3.2%
3,000	60	890	650	660	36.9%	1.5%
5,000	80	1035	677	682	52.9%	0.7%
10,000	130	1224	691	693	77.1%	0.3%

Table II – Resultant Overvoltages of Phase A for soil resistivity values from 1,000 Ω .m to 10,000 Ω .m considering the three grounding systems models.

As expected, from the voltage waves of Fig.6 and the numerical results from Table II, applying the static model (STM) leads to superior overvoltage levels to those determined considering both wideband models. These results are computed in the column Δ and varies from 12.1% to 77.1%, when compared to the benchmark (HEM). Such differences may lead to the incorrect prediction of insulation breakdown when the grounding is represented by a simple resistor with low-frequency resistance value, as will be seen in the next subsection.

In contrast, when comparing the pi-cascade model with HEM, the differences, shown in column ∂ , were between 0.3% and 3.2%, which demonstrates a comparable level of accuracy. It can be seen that there is a direct relationship between the soil resistivity, the counterpoise cable's length and the model precision, and that it becomes more precise as the previous parameters increase.

4.2 Backflashover rates

In order to estimate the backflashover rate of a transmission line, it is first necessary to calculate the critical current that would lead to the insulation breakdown. For a given set of line conditions and with the current waveform defined, it is possible to easily identify the critical peak current (I_c) that leads to the insulation breakdown. With the current waveform maintained, it is sufficient to increase its peak value until the corresponding overvoltage amplitude reaches the breaking condition. The DE method was applied to the overvoltage waves from section 4.1 to determine the peak value of the critical current I_c , with the aforementioned three representations of the grounding systems.

The calculated I_c values are shown in Table III, together with the occurrence probability of peak currents above I_c ($P(I \geq I_c)$). They are determined from the cumulative probability distribution of peak currents for first return strokes measured at the Morro do Cachimbo station - MG [19], which is approximately

$$P_I = 1/[1 + (I/45.3)^{3.9}] \quad (6)$$

According to the results of the Table III, it can be seen that the static model leads to incorrect estimates, although conservative, of the critical currents, and it becomes more prominent for soils of higher resistivity. Thus, the probabilities of occurrence of peak currents above I_c are increased, as indicated on the Δ column in Table III, and varies from 74.5% to

137.2%, when compared to the HEM. It is because HEM (and PIM) incorporate the frequency-dependent behavior of the grounding systems and the soil electrical parameters. Among other aspects, such effects lead to an improvement of impulsive grounding performance. In order to simplify, for the analyzed cases in which the length of the counterpoise cables does not exceed the effective length, the front of the lightning current wave “sees” an impulsive impedance that is lower than the low-frequency resistance. The differences among the results determined using the static model and the wideband models become more accentuated as the resistivity of the soil increases because the impact of the frequency-dependent effects are much more significant the greater the resistivity of the soil becomes.

Despite the increase, the differences between the two wideband models still remain relatively close, ranging from 4.9% to 13.2%, as seen in column δ of the Table III.

ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	L (m)	STM		HEM		PIM		Δ	δ
		I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)		
1,000	40	77	11.2%	90	6.4%	87	7.3%	74.5%	13.2%
3,000	60	46	48.5%	62	22.7%	60	25.1%	113.5%	10.3%
5,000	80	38	66.5%	55	31.9%	54	35.2%	108.2%	10.1%
10,000	130	32	79.5%	54	33.5%	53	35.2%	137.2%	4.9%

Table III – Critical currents of the transmission lines for soil resistivity values from 1,000 $\Omega \cdot m$ to 10,000 $\Omega \cdot m$ and their probabilities.

From the probability of breakdown occurrence shown in Table III, the estimated backflashover rates of the transmission line were calculated following a similar procedure indicated by Anderson [29]. The proposed methodology requires certain preliminary information, such as the geometry of the tower, the ground flash density (N_g), and the distribution of soil resistivity along the transmission line path. The value of $N_g = 10$ was considered, as it is the average value found in the state of Minas Gerais [30], where the Morro do Cachimbo Station is also located.

Table IV summarizes the results of backflashover rate estimates considering the three studied models. The analysis considers nine different soil resistivity distributions along the line: four uniform distributions (ρ_0 from 1,000 to 10,000 $\Omega \cdot m$) and three non-uniform distributions, in these cases representing varying soil conditions along the line, thus being more realistic.

Hypotheses for the distribution of ρ along the transmission line (%)				Number of Backflashovers/100km/year				
1,000 ($\Omega.m$)	3,000 ($\Omega.m$)	5,000 ($\Omega.m$)	10,000 ($\Omega.m$)	STM	HEM	PIM	Δ	δ
100%	0%	0%	0%	4.1	2.4	2.7	70.8%	12.5%
0%	100%	0%	0%	17.8	8.3	9.2	114.5%	10.8%
0%	0%	100%	0%	24.3	11.7	12.9	107.7%	10.3%
0%	0%	0%	100%	29.1	12.3	12.9	136.6%	4.9%
50%	30%	20%	0%	12.3	6.0	6.7	103.2%	10.9%
25%	35%	30%	10%	17.5	8.2	9.1	111.7%	9.8%
0%	40%	30%	30%	23.1	10.5	11.4	120.0%	8.6%
0%	20%	40%	40%	24.9	11.3	12.2	121.3%	8.0%
0%	0%	30%	70%	27.7	10.5	11.4	128.2%	6.4%

Table IV – Estimated backflashover rate of the transmission lines according to soil resistivity conditions along the line.

Consistent with the results presented before, the backflashover rates estimates when using the STM range from 4.1 to 29.1, resulting in a difference range from 70.8% to 136.6%. These results prove the importance of the rigorous representation of the line grounding system in this kind of study, at the risk of incurring in erroneous line protection strategies with a possible increase in the transmission line construction costs.

Finally, regarding to the wideband models, it is observed that the difference between PIM and HEM varies from 12.5% to 4.9%, however, for the proposed non-uniform distributions of soil resistivity (which are more realistic), these remain below 10% approximately, reaching 6.4%, and that this difference decreases as the soil resistivity and the length of the counterpoise cable increases.

In this work, it is not intended to question the accuracy of the HEM, on the contrary, after all, it was used as a benchmark. However, from the results presented, one can analyze the possibility of using it for certain conditions and applications, notably applications that need less computational effort and simulation time, such as probabilistic analysis (based on numerous simulations) and other Engineering applications simulating transmission lines with long counterpoise cables and highly resistive soils.

5 | CONCLUSIONS

The impact of grounding systems modeling on the lightning performance of transmission lines was assessed. To this aim, the grounding system was represented by three different models, namely: i) a static model, consisting of a lumped resistance with value equal to the low-frequency grounding resistance, ii) a full-wave wideband model, and iii) a pi-cascade wideband model. The frequency-dependent effect of the soil parameters was also included in ii) and iii).

The developed overvoltages were simulated using ATP/EMTP and the backflashover rates were computed in order to compare the lightning response of the transmission lines obtained from each modeling.

From the simulated cases, it is clear that using the static model, although conservative, causes overestimated results of overvoltage and backflashover rates to those determined using the most rigorous wideband models.

Finally, concerning to the wideband models, it is unquestionably that HEM produces the most accurate results, so much so that it has been used as a benchmark for the transmission line model. However, depending on the simulation conditions, the results are relatively close, and thus the possibility of using transmission line modeling in applications that present such conditions and that require low computational effort, such as probabilistic evaluations and/or other Engineering applications, is analyzed.

REFERENCES

- [1] VISACRO, S., "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines," *J. Light. Res.*, vol. 1, pp. 60–68, 2007.
- [2] VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., and DE CONTI, A., "The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 1, pp. 205–213, Jan. 2012.
- [3] CELLI, G., GHIANI, E. and PILO, F., "Behaviour of grounding systems: a quasi-static EMTP model and its validation," *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cagliari, 2010, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICLP.2010.7845954.
- [4] AMETANI, A. and KAWAMURA, T., "A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP", *IEEE Trans. Power Del.*, 20 (2005), No. 2, 867–875.
- [5] TAKAMI, J., OKABE, S., and ZAIMA, E., "Study of lightning surge overvoltages at substations due to direct lightning strokes to phase conductors", *IEEE Trans. Power Delivery*, 25 (2010), No. 1, 425–433.
- [6] SHESHYEKANI, K., AKBARI, M., TABEL, B., and KAZEMI, R., "Wideband modelling of large grounding systems to interface with electromagnetic transient solvers", *IEEE Trans. Power Delivery*, 29 (2014), No. 4, 1868–1876.
- [7] ALIPIO, R. and VISACRO, S., "Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.
- [8] VISACRO, S. and SILVEIRA, F., "The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compatibility*, vol. 57, no. 3, pp. 434–441, June 2015.
- [9] ALIPIO, R. S., SCHROEDER, M. A. O., AFONSO, M. M., and OLIVEIRA, T. A. S., "Grounding modeling for high-frequency phenomena and comparison with experimental results" (in Portuguese), *Revista SBA Controle & Automação*, 2010.

- [10] GUSTAVSEN, B. and SEMLYEN, A., "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", *IEEE Trans. Power Delivery*, 14 (1999), 1052–1061.
- [11] ALIPIO, R. and VISACRO, S., "Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 59 (2017), No. 3, 873–878.
- [12] ALIPIO, R. and VISACRO, S., "Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 55 (2013), No. 1, 132–139.
- [13] ALIPIO, R. and VISACRO, S., "Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency dependent soil parameters", *IEEE Trans. Power Delivery*, 29 (2014), No. 2, 716–723.
- [14] HILEMAN, A. R., *Insulation Coordination for Power Systems*, 1st ed., CRC Press, 1999, pp.627–640.
- [15] GERI, A. and VISACRO, S.F. "Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model", *Proc. of 26th ICLP*, Krakow, Poland, 2002.
- [16] GUIMARÃES, G.C., CHAVES, M.L.R., BOAVENTURA, W.C., CAIXETA, D.A., TAMASHIRO, M.A., and RODRIGUES, A.R., "Lightning performance of transmission lines based upon real return-stroke current waveforms and statistical variation of characteristic parameters", *Electr. Power Syst. Res.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.12.003>.
- [17] VISACRO, S., "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke", *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L07112, Apr. 2004.
- [18] BERGER, K., ANDERSON, R. B., and KRONINGER, H., "Parameters of lightning flashes", *Electra*, no. 80, pp. 223–237, 1975.
- [19] VISACRO, S., SOARES, A., SCHROEDER, M. A. O., CHERCHIGLIA, L. C. L., and SOUSA, V. J., "Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station", *Journal on Geophysical Research*, vol. 109, D01105, pp. 1–11, Jan. 2004.
- [20] DE CONTI, A. and VISACRO, S., "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.
- [21] MARTI, J. R., "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, Jan. 1982.
- [22] DE CONTI, A., VISACRO, S., SOARES, A., and SCHROEDER, M. A. O., "Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, Aug. 2006.
- [23] VISACRO, S., SOARES JR, A., "HEM: a model for simulation of lightning related engineering problems" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1026–1028, Apr. 2005.
- [24] HATZIARGYRIOU, N. D. and LORENTZOU, M., "Grounding systems design using EMTP", in *Proc. 23rd European EMTP Users Group Meeting*, Barcelona, Spain, November 9–11, 1997.

- [25] VISACRO, S. and ALIPIO, R., "Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- [26] VISACRO, S. and ALIPIO, R., MURTA VALE, M. H., and PEREIRA, C., "The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 22, no. 2, pp. 401–406, May 2011.
- [27] GUSTAVSEN, B., "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2278–2285, Oct. 2008.
- [28] GUSTAVSEN, B., Matrix Fitting Toolbox [Online]. Available: <https://www.sintef.no/projectweb/vectorfitting/>, 2020.
- [29] ANDERSON, J. G. (1982). Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition, chapter 12. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- [30] DELLALLIBERA, A., ANDRADE, A., BEZERRA, DUARTE, A., GÓIS, J., P., and MARKIEWICZ, R.. "Brazilian production development of class 2 polymeric surge arresters for transmission line application (TLA)" in *Proc. of Conference: Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems – CIGRÉ*, Cavtat, Croatia, 2008.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO EM AMBIENTES DE INTERNAÇÃO E DE CONSULTA MÉDICA EM HOSPITAIS PÚBLICOS E PRIVADOS DE ARAPIRACA-AL

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 15/01/2021

Augusto César Lúcio de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Alagoas (IFAL)
Arapiraca – Alagoas
<http://lattes.cnpq.br/3003924380138444>

Gabriel dos Santos Alves

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Alagoas (IFAL)
Arapiraca – Alagoas
<http://lattes.cnpq.br/7638190005208863>

Hapitaglo Rian da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Alagoas (IFAL)
Arapiraca – Alagoas
<http://lattes.cnpq.br/1254291593145773>

Igor Silva de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Alagoas (IFAL)
Arapiraca – Alagoas
<http://lattes.cnpq.br/1158445611623812>

RESUMO: Boas condições de iluminação são essenciais para um bom desempenho das atividades dos profissionais de saúde, dada a sua complexidade. Nesse sentido, este trabalho objetivou analisar as condições e as interferências dos aspectos luminotécnicos, como a iluminação e o uso da cor em ambientes hospitalares da cidade de Arapiraca-AL, nos quais as atividades

necessitam de extrema atenção, não abrindo margem para erros. Tendo em vista isso, o processo de análise luminotécnica é de suma importância a fim de conferir o cenário adequado de bem-estar e de produtividade no hospital. A metodologia empregada no estudo foi embasada nas normas técnicas vigentes no campo da luminotécnica, principalmente a ABNT NBR 5382/85 e a NBR 5413/92. Na coleta de dados, o aparelho utilizado foi o luxímetro, instrumento capaz de identificar as taxas de luminância. Identificou-se que 47,6% dos recintos analisados possuem iluminação natural, a iluminação artificial é composta 100% por lâmpadas fluorescentes, 12,1% das lâmpadas apresentam defeito e 91,5% das iluminâncias médias enquadram-se nos valores mínimos descritos na NBR 5413. Assim, a minoria dos ambientes destoa dos padrões técnicos, apresentando, em geral, aspectos luminotécnicos favoráveis, contribuindo com a melhoria e com a humanização dos espaços de saúde.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Luminotécnica; Iluminação no Ambiente Hospitalar; Estudo de cores.

ILLUMINATION ANALYSIS IN HOSPITALIZATION AND MEDICAL CONSULTATION ROOMS IN PUBLIC AND PRIVATE HOSPITALS OF ARAPIRACA-AL

ABSTRACT: Good lighting conditions are essential for a good performance of the activities realized by healthcare professionals, due to their complexity. In this sense, this work aimed to analyze the conditions and interferences of luminotechnical aspects, such as lighting and

color use in hospital environments of the city of Arapiraca-AL, in which activities require extreme attention, not allowing mistakes. In view of this, the process of luminotechnical analysis is of paramount importance in order to confer the ideal scenario of well-being and productivity in the hospital. The methodology used in the study was based on the technical standards in the field of luminotechnical study, mainly ABNT NBR 5382/85 and NBR 5413/92. In data collection, the device used was the luximeter, an instrument capable of identifying the rates of luminance. It was identified that 47.6% of the analyzed enclosures have natural lighting, artificial lighting is composed 100% by fluorescent lamps, 12.1% of the lamps are defective and 91.5% of the average illuminances fit the minimum values described in NBR 5413. Thus, the minority of environments are out of touch with technical standards, showing, generally, positive luminotechnical aspects, contributing to the improvement and humanization of health spaces.

KEYWORDS: Luminotechnical Analysis; Lighting in the Hospital Environment; Color study.

1 | INTRODUÇÃO

O hospital é considerado uma entidade complexa e dinâmica, onde o planejamento do seu espaço requer diversos parâmetros para o conforto, usabilidade, acessibilidade e funcionalidade de seus usuários (KASPER et al., 2009). Além disso, o hospital configura-se como um lugar de oferta de cuidados em saúde humana, desde assistência básica até níveis complexos. Dessa forma, os projetos hospitalares devem ser pensados de modo que propiciem bem-estar e conforto para a equipe profissional que trabalha no local (BONI; FORTUNA; SILVA, 2018).

Nas esferas laborais, um aspecto importante para o desempenho das atividades é a quantidade de luminosidade disponível nos recintos. “O iluminamento ou iluminância é uma grandeza expressa em lux (lx) que indica o fluxo luminoso de uma fonte de luz que incide sobre uma superfície situada a certa distância desta fonte.” (QUERIOZ et al., 2010). Nesse prisma, é importante que a iluminação esteja em níveis adequados, a fim de que o trabalho possa ser desempenhado da melhor forma possível, sem prejuízo para os profissionais devido a uma iluminação insuficiente, pois condições ruins de iluminamento podem resultar em erros (BASUKALA; DEVARAKONDA; MEHROTRA, 2015).

Dentro desse entendimento, o trabalho tem como foco o estudo dos aspectos luminotécnicos no âmbito hospitalar, tais como as iluminâncias, tipo de luminárias, presença de iluminação natural e o uso da cor, uma vez que a iluminação de hospitais requer uma maior atenção, haja vista a complexidade das atividades laborais desenvolvidas pelas equipes de saúde, a exemplo dos procedimentos médicos, dado que o ambiente iluminado de maneira adequada contribuiu para que a assistência ocorra com segurança e com qualidade. Contudo, em muitos locais, o nível apropriado de iluminação nos recintos onde essas tarefas são realizadas nem sempre é respeitado (SILVA, 2018).

O projeto luminotécnico de um ambiente deve suprir a iluminância necessária de

cada espaço e considerar o conforto ótico e os efeitos da luz nas pessoas que o ocuparão (BONI; FORTUNA; SILVA, 2018). Entretanto, os hospitais nem sempre foram projetados com preocupações relacionadas ao conforto lumínico de seus usuários (CONTI; BETEGA; SONDA, 2015).

Além da iluminação em si, outros aspectos ambientais são de igual relevância no projeto, como a distribuição cromática do recinto, visto que, além de interferir na configuração final da iluminação, causa efeitos sobre as pessoas que o ocupam. As cores devem ser empregadas de forma cautelosa e equilibrada (CONTI; BETEGA; SONDA, 2015), uma vez que as colorações influenciam diretamente o humor do ser humano (ĆURČIĆ et al., 2019). Além de que, no âmbito hospitalar, a cor pode ser um instrumento possível de ser usado para contribuir com a estética e com a humanização desse local (LOPES; NAOUMOVA, 2016).

Visto dessa maneira, evidencia-se a importância de se explorar as condições da iluminação nos setores hospitalares de assistência em saúde atualmente, e de se analisar o uso da cor enquanto ferramenta de humanização do paciente. Esperou-se, com isso, identificar os setores mais e menos prejudicados no tocante à qualidade lumínica, bem como criar um panorama da situação luminotécnica dos ambientes. Para tal, o estudo teve como objetivo analisar as condições luminotécnicas de espaços hospitalares de internação e de consulta médica em instituições de saúde do município de Arapiraca-AL, com o propósito de se verificar a aplicação das normas técnicas brasileiras de iluminação nas áreas examinadas. Para mais, se procurou estabelecer relações com questões de ergonomia e de humanização desses locais.

2 | OBJETIVOS

A realização desta pesquisa teve por objetivo geral investigar se os níveis de iluminamento em diferentes setores de hospitais de Arapiraca seguem as determinações previstas na NR 5413 – Iluminação de interiores. Ainda, o projeto visou também um levantamento das condições luminotécnicas dos ambientes, tais como o predomínio das cores, tipos de luminárias utilizadas e existência de iluminação natural nos ambientes, com a intenção de averiguar o nível de importância que é conferido pela instituição à interferência da iluminação que, como é sabido, pode impactar de maneira significativa as atividades realizadas na esfera hospitalar.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa em questão teve como base os pressupostos técnicos das normas reguladoras brasileiras no que se refere à iluminação de interiores. A investigação ocorreu em setores hospitalares de internação e consulta médica, tais como enfermarias, ambulatórios e os serviços de maternidade, pediatria, pronto-socorro e centro cirúrgico de

um hospital localizado na cidade de Arapiraca, situada no estado de Alagoas.

3.1 Caracterização do espaço estudado

A estrutura física do hospital estudado conta com ambulatorios, urgência e emergência, clínica médica, clínica cirúrgica, centro cirúrgico, unidades de terapia intensiva adulto e neonatal, unidade de cuidados intermediários, centro obstétrico e apartamentos. A instituição atende, também, pacientes de mais 50 municípios do Agreste de Alagoas, tanto pelo Sistema único de Saúde (SUS), quanto por serviços privados. A seleção foi realizada com base na existência dos dois sistemas de atendimento – público e privado – e na disposição do hospital em participar da pesquisa.

3.2 Coleta de dados

A metodologia empregada na coleta de dados foi a descrita na ABNT NBR 5382, denominada “Verificação de iluminância de interiores”, a qual descreve os procedimentos de medição com o luxímetro, que é um aparelho que mede a intensidade da luz expressa em lux (lx), assim como os meios de se obter a iluminância média do ambiente através de fórmulas matemáticas, de acordo com a formatação predial e luminotécnica do recinto. Ademais, foram analisados elementos qualitativos, como as cores dos ambientes, presença de iluminação externa e de lâmpadas defeituosas ou sem funcionamento.

Nas mensurações para a avaliação da iluminância nos ambientes de assistência de saúde, foi utilizado um luxímetro digital, marca Minipa, modelo MLM-1011, com sensor de luminosidade com fotodiodo de silício e com correção de fator óptico pela regra do cosseno. As medições ocorreram no período de dezembro de 2019 a fevereiro de 2020, entre as 09:00 e 11:00 horas, e entre as 14:00 e 17:00 horas, sendo a maioria das análises feitas neste horário.

Vale ressaltar que, a partir de 2013, a NBR ISO 8995-1: iluminação de ambientes de trabalho substituiu as normas NBR 5413 e a NBR 5382. Entretanto, no ano de 2014, o extinto Ministério do Trabalho e Emprego lançou a Nota Técnica 224/2014, a qual recomenda a permanência das normas 5413 e 5382 como referência para avaliação luminotécnica.

3.3 Etapas do estudo

A primeira etapa do estudo deu-se com as mensurações luminotécnicas *in loco*, tal como com os registros das condições de funcionamento, quantidade e tipos luminárias empregadas nas instalações elétricas dos recintos e da presença ou não de iluminação natural.

Na segunda etapa da pesquisa, foram realizados os cálculos de iluminância média para cada local visitado, a partir das equações matemáticas apresentadas na NBR 5382. Em seguida, foi feito um estudo comparativo entre os valores de iluminância média obtidos e os indicados na NBR 5413, com a finalidade de sondar o enquadramento nas exigências técnicas. Para os campos de trabalho retangulares, iluminados com fontes de iluminação

em padrão regular, simetricamente espaçadas, foi usada a equação (1).

$$ilum.média = \frac{R(N-1)(M-1) + Q(N-1) + T(M-1) + P}{NM} \quad (1)$$

Onde:

N: Número de luminárias por fila

M: Número de filas

Nos locais com formatação regular com luminária central, foi utilizada a equação (2) para definir a iluminância média.

$$Ilum.média = \frac{p1 + p2 + p3 + p4}{4} \quad (2)$$

Onde:

p: ponto de medição

A Equação (3) foi utilizada no cálculo para as áreas regulares com linha única de luminárias individuais.

$$Ilum.média = \frac{\left(\frac{q1 + q2 + q3 + q4 + q5 + q6 + q7 + q8}{8}\right)(N-1) + \frac{p1 + p2}{2}}{N} \quad (3)$$

Onde:

N: Número de luminárias

q e p: pontos de medição

Em recintos regulares com duas ou mais linhas contínuas de luminárias, foi empregada a equação (4).

$$Ilum.média = \frac{R * N(M-1) + Q * N + T(M-1) + P}{M(N+1)} \quad (4)$$

Onde:

N: Número de luminárias

M: Número de filas

R, Q, T e P: pontos de medição

Em locais regulares com linha contínua de luminárias, o cálculo da iluminação média foi realizado com a equação (5).

$$Ilum.média = \frac{QN + P}{N + 1} \quad (5)$$

Onde:

N: Número de luminárias

Q e P: pontos de medição

Na terceira etapa do projeto, foram executados os agrupamentos dos dados coletados, como também os cálculos de porcentagens dos ambientes que apresentaram iluminação externa, dos tipos de lâmpadas usadas, de lâmpadas defeituosas, de cores dos ambientes e a média aritmética de lâmpadas por ambiente.

3.4 Análise de dados

A análise ocorreu em duas fases, a primeira com exame dos dados quantitativos referentes à distribuição das iluminâncias e aspectos luminotécnicos nos diferentes setores do hospital. Já a segunda fase priorizou os aspectos qualitativos relacionados ao uso das cores nos setores de cuidados médicos.

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir da metodologia descrita estão dispostos nas Tabelas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, as quais apresentam a porcentagem dos tipos de lâmpadas usadas nos ambientes, a porcentagem de ambientes com e sem iluminação natural, média de lâmpadas por setor, obtida pela razão entre o número total de lâmpadas pela quantidade de ambientes estudados, o percentual de lâmpadas defeituosas encontradas nos recintos visitados, a iluminância média em lux (lx), obtida pela média aritmética dos iluminâncias individuais dos locais analisados, bem como os valores mínimos de iluminação descritos na NBR 5413.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Média de lâmpadas por enfermaria
Fluorescente (100%)	Presente (77,7%)	5,8 lâmpadas
	Ausente (22,3%)	
Lâmpadas defeituosas	Iluminância média	Iluminância na norma (lx)
28,3 %	222,7 lx	100 – 150 - 200

Tabela 1 - Dados luminotécnicos das enfermarias
Fonte: Autores (2020).

A Tabela 1 trata das enfermarias, onde se encontram os pacientes internados. Nessas repartições, foi identificada uma forte presença de luz natural: em 77,7% das enfermarias, fator essencial, visto o tempo de permanência dos pacientes nesses locais. Esse dado converge com os estudos de BASUKALA, DEVARAKONDA e MEHROTRA (2015), segundo os quais, a iluminação natural e o acesso às janelas são fatores estimados por pacientes no espaço hospitalar. Todavia, o percentual de lâmpadas defeituosas nesses recintos é alto: 28,3% das lâmpadas apresentaram falha ou não funcionamento. Outrossim, os valores mínimo e máximo de iluminância encontrados nesses setores foram, respectivamente,

125,6 lx e 372,3 lx. Logo, as iluminâncias encontradas estão dentro dos valores mínimos indicados pela NBR 5413.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Média de lâmpadas por sala
Fluorescente (100%)	Ausente (100%)	2 lâmpadas
Lâmpadas defeituosas	Iluminância média	Iluminância na norma (lx)
0 %	288,6 lx	100 – 150 - 200

Tabela 2 - Dados luminotécnicos da Maternidade

Fonte: Autores (2020).

A Tabela 2 refere-se à maternidade, especificamente às salas de parto, verifica-se nela que em todas as salas há ausência de iluminação natural, e que a iluminação artificial provém totalmente de lâmpadas fluorescentes. No que concerne às lâmpadas defeituosas, constatou-se que nenhuma lâmpada nesse estado foi identificada. A menor iluminância calculada foi de 191,7 lx e a máxima foi de 385,5 lx. Desse modo, as iluminâncias obtidas enquadram-se nos parâmetros normativos.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Média de lâmpadas por sala
Fluorescente (100%)	Presente (33,3%)	3,3 lâmpadas
	Ausente (66,7%)	
Lâmpadas defeituosas	Iluminância média	Iluminância na norma
0 %	297,3 lx	150 - 200 - 300

Tabela 3 - Dados luminotécnicos das salas de consulta médica

Fonte: Autores (2020).

A Tabela 3 alude às salas de consulta médica. Foram visitados ambulatórios nos departamentos de cirurgia, pronto-socorro e maternidade. Observou-se que a maioria dos ambientes não possuem iluminação natural: 66,7%, e que todas as fontes de luz artificial são fluorescentes. Não foram encontradas lâmpadas defeituosas. O valor mínimo de iluminância identificado foi de 167,2 lx e o máximo 543 lx, sendo este último mensurado no centro cirúrgico. Portanto, as iluminâncias observadas estão em conformidade com as recomendações normativas.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Média de lâmpadas por ambiente
Fluorescente (100%)	Presente (20%)	3,4 lâmpadas
	Ausente (80%)	
Lâmpadas defeituosas	Iluminância média	Iluminância na norma
0 %	232,7 lx	300 – 500 - 750

Tabela 4 - Dados luminotécnicos do Pronto-socorro

Fonte: Autores (2020).

A Tabela 4 diz respeito às salas de cuidados do pronto-socorro, nas quais foi possível observar que a maioria desses ambientes não possui luz natural: 80% dos recintos analisados. As fontes de luz artificial são todas fluorescentes e não apresentaram falhas de funcionamento em nenhum ambiente. Além disso, o valor mínimo de iluminância obtido nesse setor foi 108,2 lx e o máximo, 330,5 lx. Nesse setor, apenas 60% dos valores de iluminação atendem aos critérios normativos, enquanto 40% dos recintos apresentaram valor inferior a 300 lx, o que resultou em uma iluminância média geral 67,3 lx menor que o valor mínimo indicado em norma, ou seja, 40% dos ambientes destoam dos valores adequados e, conforme QUEIROZ et al. (2010), em espaços com iluminação inadequada, é necessário um esforço maior da visão do indivíduo.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Média de lâmpadas por sala
Fluorescente (100%)	Ausente (100%)	20 lâmpadas
Lâmpadas defeituosas	Iluminância média	Iluminância na norma
0 %	1294 lx	300 – 500 - 750

Tabela 5 - Dados luminotécnicos das salas de cirurgia

Fonte: Autores (2020).

A Tabela 5 expõe os dados coletados nas salas de cirurgia, onde é possível perceber a ausência de iluminação natural, uma alta iluminância média, bem como o alto número de lâmpadas. Vale destacar que esses recintos possuem uma luminária complementar à iluminação proveniente das instalações elétricas convencionais, o foco, que é um equipamento de luz direcionada usado para iluminar o plano de trabalho em cirurgias, permaneceu ligado durante as medições. Ademais, a iluminação artificial convencional é composta totalmente por lâmpadas fluorescentes e não foram encontradas lâmpadas defeituosas ou sem funcionamento. O menor valor de iluminância identificado foi de 1289,2 lx e o máximo de 1304,8 lx, nesse sentido, esses valores atendem aos critérios mínimos da norma supracitada.

Tipo de lâmpada	Iluminação natural	Lâmp. defeituosas	Iluminância média
Fluorescente (100%)	Presente (47,6%)	12,1%	350,3 lx
	Ausente (52,4%)		

Tabela 6 - Dados luminotécnicos gerais

Fonte: Autores (2020).

Em uma análise geral, evidenciada na Tabela 6, considerando todos os ambientes examinados, constatou-se que 47,6% possuem iluminação natural, a iluminação artificial é composta 100% por lâmpadas fluorescentes, 12,1% das lâmpadas apresentaram defeito e 91,5% das iluminâncias enquadram-se nos valores mínimos da NBR 5413. Esse percentual de enquadramento é bom, visto que condições de iluminação adequadas são fundamentais para a realização de atividades visuais por funcionários em hospitais, e más condições de iluminação podem resultar em erro (BASUKALA; DEVARAKONDA; MEHROTRA, 2015).

4.1 As cores no ambiente hospitalar

Cores e iluminação nos hospitais podem ter um grande impacto na disposição dos pacientes e na humanização do espaço. E por esse motivo, de acordo com BETTEGA, CONTI e SONDA (2015), um bom projeto de iluminação deve contemplar os aspectos de humanização do ambiente. As porcentagens das cores utilizadas nos locais estudados estão dispostas no Gráfico 1.

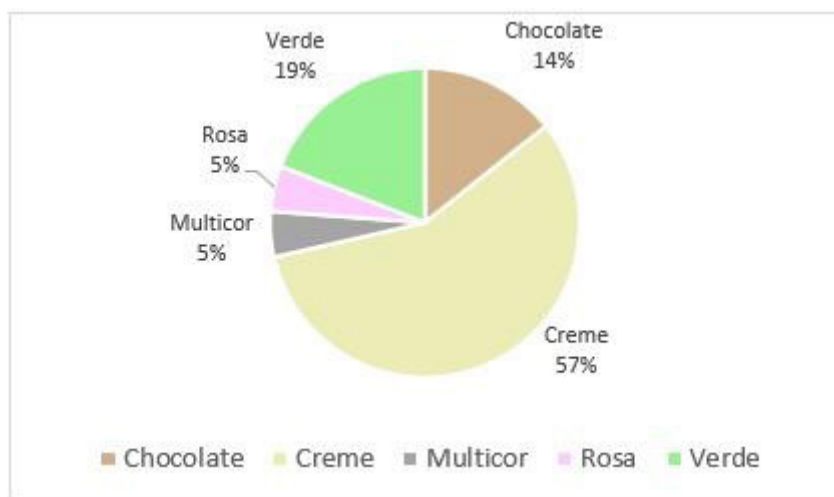


Gráfico 1 - Distribuição cromática dos ambientes hospitalares analisados.

Fonte: Autores (2020).

Percebe-se, no gráfico 1, a predominância da cor creme (57%), seguida pela cor verde (19%) e pela cor chocolate (14%) e, em menores proporções, constatou-se o uso do rosa (5%) e ambientes multicolores (5%). Em relação às cores observadas, o uso de cores variadas, a depender do ambiente, é muito importante, dado que, em conformidade com as pesquisas de ĆURČIĆ *et al.* (2019), uma pessoa reage de modo diferente às cores e essas podem causar diferentes efeitos emocionais nos seres humanos.

Ainda, pôde-se apontar que os ambientes multicolores foram todos encontrados no setor de pediatria. Isso é muito importante para proporcionar à criança e aos familiares um espaço lúdico e humanizado, que amenize o estresse de estar em um hospital. Esse quesito do uso diferentes cores no setor de pediatria corrobora as análises de LOPES e NAOUMOVA (2016), segundo as quais um ambiente humanizado é capaz de despertar estímulos positivos.

5 | CONCLUSÃO

O estudo mostrou que os aspectos de cores e iluminação em espaços de tratamento de saúde estão ligados tanto à ergonomia, à saúde do trabalhador e à humanização dos locais, tendo em vista alcançar um ambiente menos estressante e acolhedor aos pacientes. Além da humanização, uma boa iluminação proporciona uma maior segurança para profissionais e pacientes, visto que um bom projeto de iluminação reduz a probabilidade de erros.

A iluminação natural revelou-se como fundamental no projeto hospitalar, uma vez que é preferível pelas pessoas. A luz natural foi encontrada majoritariamente nas enfermarias, onde os pacientes passam mais tempo internados. No que tange à iluminação artificial, seus valores mínimos de iluminância aumentam de acordo com o nível de complexidade do atendimento que é prestado.

O uso de cores interfere nas sensações que cada pessoa tem do ambiente, assim sendo, um bom planejamento cromático pode ofertar aos usuários dos espaços um maior conforto e tornar a experiência de estar em um hospital menos estressante.

AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO

Este artigo é fruto de um projeto do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), intitulado “Análise da iluminação em ambientes de internação e consulta médica de hospitais públicos e privados do município de Arapiraca-AL”, da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação do Instituto Federal de Alagoas – IFAL, desenvolvido no IFAL – Campus Arapiraca.

REFERÊNCIAS

- BASUKALA, Sunil; DEVARAKONDA, Shiva; MEHROTRA, Sameer. **Effective Lighting Design Standards Impacting Patient Care: A Systems Approach**. Journal of Biosciences and Medicine, vol. 3, n. 11, p. 54-61, nov. de 2015.
- BETTEGA, Patrícia; CONTI, Carla Jussara; SONDA, Carolina de Moraes. **Cores e iluminação em ambientes hospitalares**. In: 13º ENCONTRO CIENTÍFICO CULTURAL INTERINSTITUCIONAL. 2015. Anais do 13º Encontro Científico Cultural Interinstitucional, 2015. p. 1-3.
- BONI, Cláudio; SILVA, Conrado Renan; FORTUNA, Talita Carli. **Conforto ambiental hospitalar na perspectiva dos hospitais da rede Sarah Kubistchek**. Revista Contemporânea: Revista Uniletoledo: Arquitetura, Comunicação, Design e Educação, v. 3, n. 01, p. 74-88, jan/jun 2018.
- ĆURČIĆ, Aleksandra *et al.* **Effects of color in interior design**. In: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE CONTEMPORARY ACHIEVEMENTS IN CIVIL ENGINEERING. 2019. Subotica, Serbia. Abr. 2019. p. 867-876.
- KASPER, Andrea de Aguiar *et al.* **A Influência da Iluminação como Fator de Humanização em Ambientes Hospitalares: o Caso das Salas de Espera e dos Corredores Hospitalares**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. São Carlos, SP: USP, 2009. p. 89-100.
- LOPES, Leila; NAOUMOVA, Natalia. **O uso da cor como ferramenta de humanização de ambientes de assistência à saúde infantil sob a percepção do usuário: caso de estudo Pelotas, RS**. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO. 2016. Porto Alegre: PROPAP / UFRG, jul. de 2016. p. 1-20.
- QUEIROZ, et al. **Estudo de caso: Impactos da iluminação inadequada em área de internação hospitalar**. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA - VII SEGTeT, 2010; Rio de Janeiro. 2010. p. 1-12.
- SILVA, Livia Gabriela da Costa. **QUALIDADE LUMÍNICA PERCEBIDA EM ENFERMARIAS HOSPITALARES: Estudo no Hospital das Clínicas de Pernambuco**. 2018. 145f. Dissertação (Mestrado em Ergonomia) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Recife, 2018.

SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM BASE EM SENSORES DE PRESENÇA E BLUETOOTH

Data de aceite: 22/02/2021

Wyctor Fogos da Rocha

Coordenadoria de Engenharia Elétrica
Campus Vitória
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo (IFES)
Vitória – ES
<http://lattes.cnpq.br/4007121503172740>

Mário Mestria

Coordenadoria de Engenharia Elétrica
Campus Vitória
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo
(IFES)
Vitória – ES
orcid.org/0000-0001-8281-0806

RESUMO: Nos últimos anos no Brasil, um problema que surgiu é o aumento do valor da conta de energia elétrica. Assim, surge a necessidade de revisar como a energia elétrica pode ser usada da melhor maneira. Neste trabalho, o objetivo do projeto é utilizar um microprocessador para automatizar o estado ligado/desligado das lâmpadas via Bluetooth, para reduzir o consumo de energia elétrica. Aplicação, por exemplo, podem variar como um corredor com lâmpadas acendendo e desligando uma a uma, assim como pode ser usado em garagens, escadas, salas de aula e galpões comerciais. Na literatura, nos últimos anos foram desenvolvidos projetos que reduzem o consumo de energia elétrica através de sistemas de automação. No entanto, nenhum projeto

foi encontrado, do nosso conhecimento, que utiliza placa de desenvolvimento e dispositivos eletrônicos, ambos de baixo custo, e software livre para implantação em vias públicas.

PALAVRAS-CHAVE: Microprocessador. Design automation. Lighting control. Costs. Infrared sensors. Bluetooth.

ABSTRACT: In recent years in Brazil, one problem that has arisen is the increase of the value of the electric energy bill. So emerge the need of revising how electric energy can be used in the best way. In this work, the objective of the project is to use a microprocessor to automate on/off state of the lamps via Bluetooth, to reduce the consumption of electric energy. Application, for example, can range as a corridor with lamps turning on and off one by one, as it may be used in garages, staircases, classrooms, and commercial shed. In the literature, in the last years were developed about the projects that reduce the consumption of electric energy through the automation systems. However, no project was found, of our knowledge, which it uses development board and electronic devices, both with low cost, and free software for deployment on public streets.

KEYWORDS: Microprocessor. Design automation. Lighting control. Costs. Infrared sensors. Bluetooth.

1 | INTRODUÇÃO

Dentre os diversos desafios que surgem no mundo e no Brasil, nos últimos anos, destaca-se o aumento nas contas de energia elétrica. Isso gera uma necessidade da revisão de como

a energia pode ser utilizada da melhor forma, a fim de se evitar o seu desperdício.

Segundo ABESCO (Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Conservação de Energia), o Brasil tem perdas anuais por volta de mais de dez bilhões de reais, como resultado do mau uso da energia gerada anualmente ABESCO (2018). Desta forma, gerou-se a necessidade de sistemas de controle que minimizassem essas perdas (COLAK et al., 2012).

Em diversos ambientes residenciais e comerciais as luzes, os ventiladores, dentre outros equipamentos elétricos são inadvertidamente ligados. Pessoas estão esquecendo-se de desligar os aparelhos elétricos enquanto saem desses ambientes. Isso resulta em perda de energia e consequentemente de valores econômicos.

Para auxiliar na economia de energia estão sendo utilizadas cada vez mais tecnologias capazes de projetar sistemas automatizados. Esses sistemas corroboram em benefício da vida das pessoas e contribui para a comunidade em geral (ALBELA et al., 2016), (KARTHIKEYAN; SARAN SRIRAM; PIYUSH, 2018), (PIYARE; TAZIL, 2011) e (MUMTAZ, 2018). Aplicações de economia de energia são, por exemplo, desde um corredor com lâmpadas acendendo e apagando uma a uma através de um sistema de controle, até sistemas automatizados para garagens, escadas, sala de aulas e galpões comerciais.

Dentre as tecnologias de sistemas automatizados podemos citar as que são de custos reduzidos: uso de celular de pouca valia financeira, placas de desenvolvimento, sensores de presença, transdutores e relés. Aliado a isso, modos de tecnologia de comunicação com conexões sem fio (ondas de rádio, Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee e Z-Wave) estão de fácil disponibilidade no mercado (DAMKONDE, 2018).

As placas de desenvolvimento mais popular são o Arduino. Segundo Ferroni et al. (2015) o Arduino pode ser conectado a LED (Light Emitting Diode), displays de matriz de pontos, botões, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de distância, receptores GPS (Global Positioning System), módulos Ethernet ou qualquer outro dispositivo que emita dados ou possa ser controlado.

A programação para a placa do Arduino é através da sua IDE (Integrated Development Environment), um software livre (regido num projeto copyleft) no qual pode escrever o código numa linguagem baseada em linguagens de programação C/C++ e permite uma comunicação serial. Diversas aplicações foram desenvolvidas utilizando Arduino (SIMÕES et al., 2018), (LEITE et al., 2019) e (LOBATO et al., 2019).

Uma das propostas desse trabalho é que possa vir a ser realizado com um baixo custo e executado, por exemplo, com a placa de desenvolvimento Arduino (FERRONI et al., 2015). Além disso, o Arduino permite módulos adicionais, como sensor de presença e receptores de sinais via Bluetooth, podendo ser necessário o uso de módulos de sinal Wi-Fi em trabalhos futuros sem grandes alterações no projeto.

Dessa forma, esse trabalho propõe um sistema automático de controle de iluminação via Bluetooth Mon (2015) com a finalidade de economizar energia e dinheiro. O trabalho terá dois cenários a serem estudados: interno com sensores detectando presença de

pessoas e externo com sensores captando movimento de automóveis.

Iremos primeiro aplicar em um cenário interno dentro de laboratório com uso de lâmpadas incandescentes e em seguida, estender nosso trabalho a um cenário externo em vias públicas. Esse último cenário será em logradouros com os sensores atuando, de acordo a passagem de automóveis, e alternando os estados das lâmpadas tipo multivapor metálico.

Na literatura podem ser encontrados diversos artigos que apresentam sistemas de automação inteligente para economia de energia (KNOBLOCH; BRAUNSCHWEIG, 2017), (KUMAR et al., 2016), (MOURI et al., 2015), (OZADOWICZ; GRELA, 2017) e (SELVARAJ, 2017). A diferença para o nosso sistema proposto envolve placa de desenvolvimento, dispositivos de baixo custo, uso de software livre e interface amigável. Além disso, serão realizados diversos testes em cenários diferentes com os sensores captando em diferentes escopos: interno e externo, descrito anteriormente.

Este artigo é estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a metodologia; a seção 3 apresenta os resultados obtidos e as discussões; a seção 4 mostra a comparação com a literatura, e por fim, a última seção apresenta as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

2 | METODOLOGIA

Dadas às várias experiências realizadas em laboratórios e em vias públicas, esse trabalho é classificado com um estudo de campo com experimentos empíricos dentro de uma pesquisa com abrangência exploratória.

Nesse trabalho foram utilizadas as seguintes premissas: criar o projeto com código regido por software livre, ter circuitos de baixo custo, ser viável e criar modelos protótipos para avaliar possíveis problemas e verificar viabilidades. Na Figura 1 tem-se um diagrama de blocos do projeto proposto.

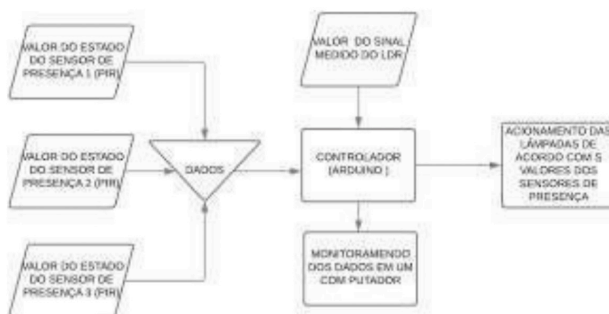


Figura 1 - Diagrama de blocos do projeto proposto destacando sensores e LDR

Fonte: Autores, 2019.

2.1 Ambiente de desenvolvimento

Para a realização dos primeiros testes, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento do Arduino, a fim de se começar o processo de testes desde os sensores até o esboço do código principal, feito em linguagem C/C++. Além disso, foram utilizados os softwares: (1) NetBeans, para a produção da interface de controle (Figura 3) e para a comunicação entre o hardware e o computador; (2) software Excel, para aquisição e registro dos dados e produção dos gráficos; (3) programa online Fritzing para a modelagem inicial do circuito e, por fim; (4) software MATLAB para os cálculos do consumo e plotagens dos gráficos, ver Figura 5.

Entre os materiais que foram utilizados, em princípio nesse plano de trabalho, além dos citados acima, temos:

1. Arduino Mega 2560 R3;
2. Cabo de alimentação do hardware;
3. LED's
4. Módulo Bluetooth HC-05;
5. LDR;
6. Sensores de movimento infravermelho;
7. Notebook (Aquisição dos dados);
8. Software NetBeans IDE 8.2;
9. Software PLX DAQ v.2 (aquisição de dados do Arduino e plotador dos gráficos no Excel);
10. Programa Fritzing (modelo do circuito utilizado); 11. Protoboards; 12. Jumpers.

2.2 Fluxograma do Programa

De modo geral, a ideia do projeto pode ser compreendida por meio do fluxograma através da Figura 2(a) e Figura 2(b).



Figura 2(a) - Fluxograma com a sequência de ações a serem ou não tomadas em relação à movimentação dos objetos

Fonte: Autores, 2019.

Na Figura 2(a) e na Figura 2(b) descreve-se as etapas do projeto através de dois fluxogramas, onde, no primeiro são declaradas e inicializadas as variáveis a serem utilizadas no programa, por exemplo, contador (cont) da quantidade de lâmpadas.

No segundo, mostra o bloco de repetição que analisa o estado de cada lâmpada e dependendo do valor do estado lido, são realizadas ações. As ações são ligar as lâmpadas e incrementar com um valor unitário a variável cont. Em seguida é impresso na tela do programa, o tempo total em que as lâmpadas ficaram acesas.

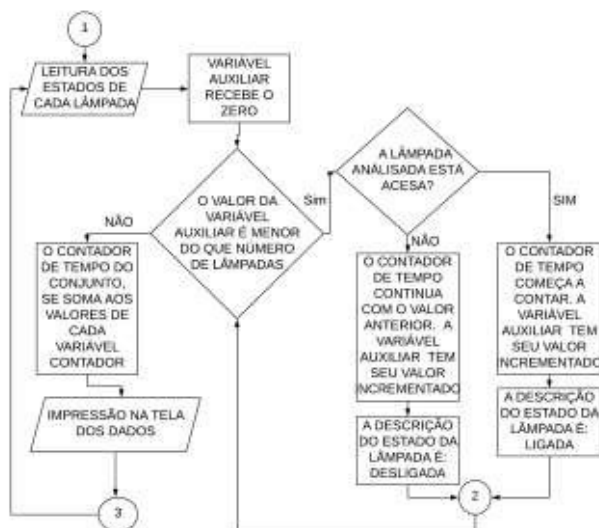


Figura 2(b) - Fluxograma com a sequência de ações a serem ou não tomadas em relação à movimentação dos objetos

Fonte: Autores, 2019.

2.3 Históricos das etapas da metodologia

Ao longo do período de um ano de pesquisa e desenvolvimento do projeto foram realizados estudos e levantamento da literatura sobre uso de plataformas de hardware livre e adotou-se o uso do hardware Arduino, plataforma de baixo custo. Foram realizadas pesquisas sobre o uso do hardware Arduino para o acionamento de cargas (lâmpadas) tanto no uso residencial quanto no meio público.

Logo depois, foram desenvolvidos os primeiros códigos básicos para o projeto, além de ser realizado o planejamento das funcionalidades que deveriam estar presentes no código para atender os requisitos funcionais e não funcionais desejados.

Após isso, foi realizada a criação de modelos do código principal para o acionamento de dois LEDs com a descrição do acionamento no monitor serial do Arduino. Nesta atividade foram utilizados princípios como alguns apresentados no trabalho de Vega, Santamaria e Rivas (2014), onde a ideia de criar um programa físico (código e o circuito) de baixo custo, tornando a ideia do projeto viável, ou pelo menos a criação de um modelo.

Em seguida, introduziu os códigos e foram implantadas cargas através da substituição dos LEDs por lâmpadas acionadas via relés de quatro canais.

Mais adiante, foram inseridos os sensores de infravermelhos como atuadores, que apesar dos problemas iniciais apresentados por eles em relação ao funcionamento, cada um atuou como desejado. De modo análogo ao trabalho dos autores Cabral e Campos

(2008) foram vistos que o uso dos sensores infravermelhos torna o custo do projeto viável para o uso em residências e se estendendo a outros ambientes.

Após a montagem e melhorias no modelo inicial do aplicativo, foram terminados os testes do aplicativo em conjunto com o circuito, de modo que foi possível a comunicação e monitoramento do aplicativo com o programa no Arduino. Além disso, como pode ser visto no trabalho de Lecceseo (2013), um sistema autônomo é possível de ser feito em ambientes como calçadas e ruas. E até mesmo, em locais como condomínios, onde há um fluxo de veículos à velocidade baixa.



Figura 3 - Interface com os estados das lâmpadas

Fonte: Autores, 2019.

Após as etapas anteriores, foi estudado o uso de sensores para captar a presença de automóveis em logradouros com intuito de acender lâmpadas em postes.

Observa-se no estudo com o fluxo de veículos durante os testes do programa, com as lâmpadas, que o consumo da memória principal dinâmica por parte do Arduino foi considerável. Nessa situação os dados apurados dos estados das lâmpadas e impressão na tela foi aproximadamente 17% da memória dinâmica.

Visando a otimização do programa foi projetado uma interface (em linguagem Java) para melhorá-lo e com a possibilidade de aumentar o número de lâmpadas de modo a melhorar o processamento dos dados pelo hardware

Arduino. A estratégia utilizada foi deixar o Arduino obter os estados das lâmpadas e esses estados foram enviados através de conjunto de caracteres (uma string) para o programa em Java. Esse programa realiza a divisão dos dados na string recebida e plota os dados de cada lâmpada na tela.

Nessa situação observamos melhoria significativa (quase 6% da memória dinâmica passou a ser utilizada). Assim, pode-se atribuir novas funcionalidades ao código principal, como por exemplo, a contagem de tempo total em que as lâmpadas ficam acionadas.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros testes em cenários internos foram no laboratório com montagem no número de lâmpadas incandescentes que variam entre uma a três. Foi observada uma economia de energia de aproximadamente 75% do consumo através do uso de lâmpadas incandescentes nas diversas configurações.

Após o término dos testes em laboratório, da melhoria em relação à redução do uso de memória principal no Arduino e ao tempo de resposta de processamento dos dados, foram realizados testes em cenários externos. Esses cenários são em vias públicas com coleta de dados e uso de lâmpada de multivapor metálico, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.

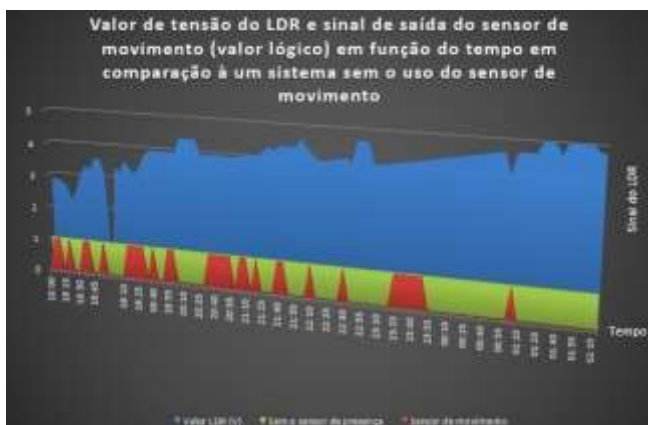


Figura 4 - Gráfico com mostrando o consumo de energia de uma lâmpada com o uso do sensor de presença e com sua ausência

Fonte: Autores, 2019.

No gráfico da Figura 4, no eixo x mostra o tempo da coleta de dados com o sistema funcionando e no eixo y os valores do sinal de saída dos sinais dos sensores. Em vermelho, mostra os sensores de presença atuando, em verde com o sistema corrente instalado (sem a introdução do nosso projeto) e em azul o sinal dos sensores de luminosidade. Com o teste realizado obtêm-se os seguintes resultados em relação ao consumo de energia, mostrado a seguir.

3.1 Cálculo do consumo de energia com a presença de um sistema de controle autônomo

- Observação 1: Cálculo realizado com base nas informações disponíveis no site da prefeitura de Vitória - ES (PMV, 2018);
- Observação 2: Cálculo realizado dentro do tempo registrado em teste (de 150 medidas);
- Observação 3: Lâmpada de multivapor metálico 400 W.

Na Tabela 1 é mostrada a comparação entre os consumos de energias: (1) com a presença do nosso sistema proposto de controle autônomo (uso dos sensores de presença); (2) com o sistema atual instalado no poste (sensor de luminosidade). Houve uma redução de 81,05% no tempo de uso das lâmpadas ocasionando uma redução no consumo de energia em relação ao consumo total instalado anteriormente, passou de 11.880 kJ para 2.250,89 kJ.

Comparação das medições	Com sensor luminosidade no poste	Com o sistema proposto de controle autônomo	Redução
Tempo da carga acionada (min)	495 min	93,79 min	401,21 min
Energia gasta (kJ)	11.880 kJ	2.250,89 kJ	9.629,11 kJ

Tabela 1 - Valores dos Dados Obtidos

Fonte: Autores, 2019.

Na Tabela 2 são mostrados os custos dos materiais considerando uma instalação num único poste e considerando uma única lâmpada.

Material	Quantidade	Preço (R\$)
Placa Arduino (modelo Nano)	1	27,63
Módulo Bluetooth (HC-05)	1	23,50
Placa com relé (1	1	10,90 canal)
Sensor (PIR HC-SR501)	1	15,50
Total		77,53

*Preço médio dos itens utilizados.

Tabela 2 - Valores dos Preços* de Cada Item

Fonte: Autores, 2019.

A seguir, é mostrado o valor de economia em termos monetários. Considerando, $1 \text{ kJ} = 1 \text{ kW} \times \text{s}$, ou ainda $1 \text{ kW} \times \text{s} = 2,78 \times (10)^{-4} \text{ kWh}$. Seja a redução no tempo de 401,21 minutos (6,69 horas), conforme Tabela 1. Além disso, o valor de 1 kWh para a iluminação pública, de acordo com a concessionária de energia elétrica local tem o valor de R\$ 0,33737 - extraído na tabela B4b da concessionária para iluminação pública (EDP, 2019).

Com essas informações, tem-se: $0,33737 \times 6,69 = \text{R\$ } 2,26$. Como o experimento tratou de uma lâmpada no valor de R\$ 2,26 para cada período de noite, onde foi realizado o estudo e considerando 30 dias, temos no mês o valor R\$ 67,80. Assim, em menos de dois meses temos o retorno do investimento.

Desta forma, o investimento é viável, seja ele implantado pela concessionária, prefeitura ou outras organizações. No final o cliente da concessionária teria uma redução em sua conta de energia devido à redução do uso da eletricidade.

Na Figura 5 apresenta-se um gráfico que mostra o consumo de energia com o uso do sistema proposto, onde mostra o gasto de energia por acionamento do sensor em função do tempo.

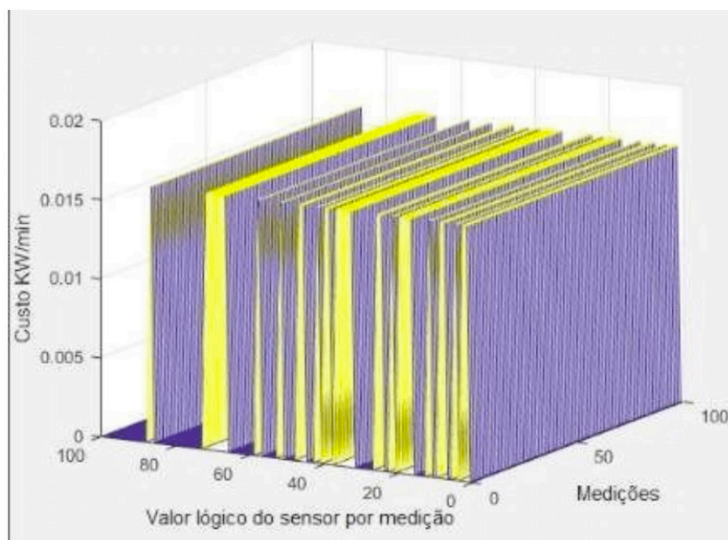


Figura 5 - Gráfico do consumo de energia em função dos acionamentos e do tempo

Fonte: Autores, 2019.

Nesse projeto obtêm-se resultados além dos que se havia esperado, desde a implantação do sistema proposto em locais com movimento de pessoas e de carros, até a criação de uma interface para otimização do processamento de dados, passou de 17% para 6% da memória dinâmica utilizada, ver seção 2.3.

O sistema proposto apresentou um resultado melhor do que está em uso atual no que diz respeito à economia de energia. Houve uma redução de energia no valor de 9.629,11 kJ, conforme descrito na Tabela 1.

Esclarecemos que o tipo de sensor utilizado apresenta limitações, como o tempo de acionamento e o alcance do mesmo. O esquema da Figura 6 ilustra uma situação no qual o sistema proposto de controle autônomo foi observado.

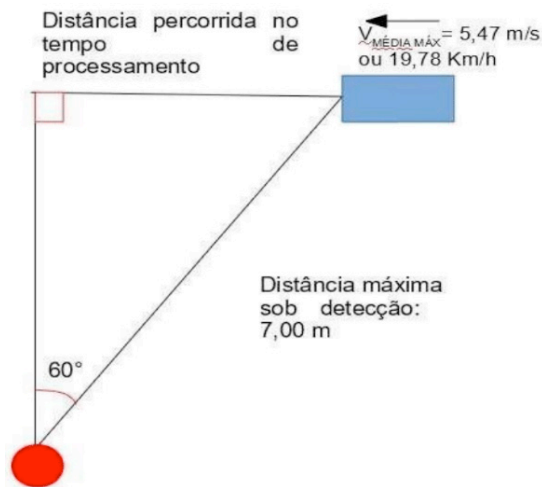


Figura 6 - Captação do sinal de presença pelo sensor devido à movimentação do carro
Fonte: Autores, 2019.

No. registro de fonte	Título do Artigo	Tecnologia Utilizada
1	Implementation of Smart Class Room Using WAGO PLC	WAGO PLC e Arduino Uno
2	Smart Lighting System using Raspberry Pi	Raspberry Pi
3	Automatic Lighting And Control System For Classroom	PIR Sensor, Relay e Bluetooth Module
4	Automatics Room Light Controller with Visitor Counter	Infrared (IR) Transmitter, IR Receiver, Microcontroller, Bidirectional Visitor Counter, Section Display Automatic Room Light controller section LCD Display e Relay Darlington pair

5	Low-Cost Home Automation Using Arduino and Modbus Protocol	Communication Protocol e Arduino Uno
6	Smart Office Automation System for Energy Saving	PIR Sensor, Light Dependent Resistor (LDR), Voltage Comparator e Relay Module
7	Bluetooth based home automation system using cell phone	Cell Phone, Arduino BT e Bluetooth
8	Automatic Gadget Control System Using Arduino And PIR Sensor	PIR Sensor, Arduino Uno e Relay Module
9	Automatic Lighting and Security System Design using PIR Motion Sensor	PIR Sensor, Microcontroller, Relay, Opto Coupler e Voltage Regulator
10	Automatic Lighting Using Arduino and PIR Sensor	Arduino, PIR Sensor e Relay Module

Tabela 3 - Sumário da Pesquisa da Literatura

Fonte: Adaptado de AyyubKhan, Gayasoddin e Lenina, 2018.

4 | CONCLUSÕES

Nesse artigo foi apresentado um sistema de automação para controle de iluminação cujas vantagens são o custo baixo e a economia de energia. O sistema utiliza sensor de presença, Bluetooth, envolve placa de desenvolvimento e dispositivos de custos reduzidos, flexíveis e programas livres regido num projeto copyleft.

Esse sistema permitiu resultados expressivos em eficiência energética considerando cenários internos (economia de energia de aproximadamente 75%) e externos (redução em torno de 81% do consumo de energia elétrica).

Em menos de dois meses há retorno nos investimentos, conforme Tabela 2, aplicados a cada poste. Desta forma, esse artigo atesta com as propostas na redução do consumo de energia elétrica.

Dado as experiências em laboratório para elaboração do sistema de automação, o trabalho proposto pode ser abordado em sala de aula e replicado na forma de projetos para contextualizar na área de ensino interdisciplinar. Isso se deve ao fato de envolver as áreas de eletrônica, linguagens de programação, conservação de energia e processamento de sinais.

Como ilustrado nas Figuras 4 e 6, o tempo de processamento, tanto do sensor quanto do programa, considera limites da velocidade dos veículos em uma determinada via (ruas e avenidas), onde sistema de automação proposto poderá ser implantado. Assim, existe uma limitação do sistema de automação com uso deste tipo de sensor devido ao tempo de acionamento e ao alcance do sinal.

Sistemas de automação baseado em Bluetooth é um sistema flexível e de baixo custo. Mas, a captação do sinal baseado nesse sistema, só funciona no curto alcance da rede sem fio Bluetooth, no máximo 10 metros. Entretanto, estamos planejando nos trabalhos futuros a implantação de recursos de transmissão dos dados via Wi-Fi, como meio de alcançar um maior número de locais monitorados e distâncias maiores.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho tem o suporte do IFES através do Edital PRPPG 05/2017 PIBIC/PIVIC, projeto de número PJ00002933 e plano de trabalho PT00005557.

REFERÊNCIAS

VABESCO (Associação Brasileira das empresas de Serviços de Conservação de Energia). Disponível: <http://www.abesco.com.br/pt/novidade/desperdicio-deenergia-atinge-r-617-bi-em-tres-anos>. Acesso em: Feb. 15, 2018.

ALBELA, M. S.; LAMAS, P. F.; CARAMÉS, T. M. F.; DAPENA, A.; LÓPEZ, M. G. Home Automation System Based on Intelligent Transducer Enablers. *Sensors*, vol. 16, n. 10, 2016.

AYYUBKHAN, P. H. S.; GAYASODDIN, S. S. S. S.; LENINA, S. V. B. Automatic Gadget Control System using Arduino and PIR Sensor. *International Journal of Management, Technology And Engineering*, vol. 8, n. 11, p. 458-464, 2018.

CABRAL, M. M. A.; CAMPOS, A. L. P. S. Sistemas de Automação Residencial de Baixo Custo: Uma Realidade Possível/Low Cost Home Automation Systems: A Possible Reality. *HOLOS*, Natal, vol. 24, n. 3, pp. 26-32, 2008.

COLAK, I.; WILKENING, H.; FULLI, G.; VASILIEVSKA, J.; ISSI, F.; O. Kaplan. Analysing the efficient use of energy in a small smart grid system. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Nagasaki, 2012, pp. 1-4.

DAMKONDE, A. IoT based Home Security and Automation System: A Review. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, vol. 7, n. 2, 2018.

EDP (Energias de Portugal). Tarifas: clientes atendidos em Baixa Tensão (Grupo B). Disponível: <http://www.edp.com.br/distribuicao-es/saibamais/informativos/tabela-de-fornecimento-de-baixa-tensao>. Acesso em: Fev. 20, 2019.

FERRONI, E. H et al. A Plataforma Arduino e suas aplicações. *Revista da UIIPS*, vol. 3, n. 2, p. 133-148, 2015.

KARTHIKEYAN, R. A; SARAN SRIRAM, K.; PIYUSH, D. Automatic Lighting Using Arduino and PIR Sensor. *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCTST)*, vol. 6, n. 5, p. 58-60, 2018.

- KNOBLOCH, F.; BRAUNSCHWEIG, N. A Traffic-Aware Moving Light System Featuring Optimal Energy Efficiency, *IEEE Sensors Journal*, vol.17, n. 23, 2017.
- KUMAR, S.; DESHPANDE, A.; HO, S. S.; KU, J. S.; SARMA, S. E.. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. *IEEE Sensors Council*, vol.16, n. 12, 2016.
- LECCESEO, F. Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting Using a ZigBee Network of Devices and Sensors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, n. 1, 2013.
- LEITE, S. H. F. et al. Implementação de Canal Seguro para Transmissão de Dados Médicos. *Revista Sodebras [on line]*. v. 14, n. 161, Maio/2019, p. 38-43, ISSN 1809-3957. <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.14.2019.161.38>
- LOBATO, P. A. et al. Análise da Relação da Cultura Maker, Fablabs e Robótica Educacional na Educação. *Revista Sodebras [on line]*. v. 14, n. 157, Jan./2019, p. 6065, ISSN 1809-3957. <https://doi.org/10.29367/issn.18093957.14.2019.157.60>
- MON, Y. J.. The Bluetooth Based LED Control For Arduino Test Platform By Using Mobile APP. *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 4, n. 6, 3 pp., 2015.
- MOURI, S. P.; SAKIB, S. N.; FERDOUS, Z.; TAHER, M. A. Automatic Lighting and Security System Design using PIR Motion Sensor. *Journal of Information Technology, Jahangirnagar University*, vol 14, n. 8, p. 1-5, 2015.
- MUMTAZ, Z. et al. An Automation System for Controlling Streetlights and Monitoring Objects Using Arduino. *Sensors*, vol. 18, n. 10, 2018.
- OZADOWICZ, A.; GRELA, J. Energy saving in the street lighting control system - a new approach based on the EN15232 standard. *Springer Link*, vol. 10, n. 3, 2017.
- PIYARE, R.; TAZIL, M. Bluetooth based home automation system using cell phone. *IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, Singapore, 2011, pp. 192-195.
- PMV (Prefeitura Municipal de Vitória). Iluminação pública. Disponível: <http://www.vitoria.es.gov.br/cidade/iluminacaopublica>. Acesso em: Mar. 11, 2018.
- SELVARAJ, K. Smart Office Automation System for Energy Saving. *International Journal of Advances in Computer and Electronics Engineering*, vol., n. 9, pp. 812, 2017.
- SIMÕES, T. A. et al. Desenvolvimento de um Sistema Inteligente de Detecção e Monitoramento para evitar Sinistros com Queda de Torres de Transmissão de Energia. *Revista Sodebras [on line]*. v. 13, n. 153, Set./2018, p. 108- 112, ISSN 1809-3957. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N153.pdf>. Acesso em: Abr. 14, 2019.
- VEGA E., Adriana Marcela; SANTAMARIA P., Francisco; RIVAS T., Edwin. Internet de los objetos empleando arduino para la gestión eléctrica domiciliaria. *Revista Escuela de Administración de Negocios. Bogotá*, n. 77, p. 23-41, July 2014.

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA UM FOTÔMETRO

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 04/01/2021

Gabriela Dias Alba

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8628678348027322>

Alberto Noboru Miyadaira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná

Oldair Donizeti Leite

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8436215509083608>

Domingos Perego Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8773388323064714>

Eduardo Cezar Lenz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/3480202879421372>

João Pedro de Araújo Nespolo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1269642729910260>

RESUMO: Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema supervisório para fotômetro, equipamento comumente empregado em laboratórios de análises

(áreas: química, alimentos, ambiental, etc) empregando o conceito de absorção da radiação espectrofotométrica, região do visível por espécies moleculares. Os fotômetros também são utilizados associados a técnicas como detectores em sistemas cromatográficos, eletroforese capilar, imunocromatografia ou análise em fluxo contínuo. O protótipo fotométrico proposto é constituído por LED-RGB, como fonte de radiação (região do visível), três sensores de luminosidade, monitoramento da radiação (sinal analítico) e, microcontrolador para gerenciar o acionamento da radiação da fonte de emissão (LED) e detecção da radiação (sensores). A linguagem do supervisório foi desenvolvido em linguagem LabVIEW. No supervisório é possível selecionar qual radiação é emitida pelo LED, gerenciar sinais de corrente dos sensores e processá-los em uma medida analítica (absorbância, empregando o conceito da lei de Beer). Após ensaios de medidas realizadas com o protótipo, concluíram-se que a arquitetura proposta do supervisório se mostrou adequado para gerenciar o funcionamento do fotômetro, sendo possível controlar o processo de funcionamento do protótipo, etapas da escolha da radiação para as medidas, acompanhamento das medidas em tempo real, processamento dos sinais elétricos e transformação em sinal analítico adequado.

PALAVRAS-CHAVE: Software de controle. LabVIEW. Espectrofotometria.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A SUPERVISORY SOFTWARE FOR A PHOTOMETER

ABSTRACT: This work presents the development of a supervisory system for photometer, equipment commonly used in analysis laboratories (areas: chemistry, food, environmental, etc.) employing the concept of absorption of spectrophotometric radiation, region of the visible by molecular species. Photometers are also used in conjunction with techniques such as detectors in chromatographic systems, capillary electrophoresis, immunochromatography or continuous flow analysis. The proposed photometric prototype consists of LED-RGB, as a radiation source (visible region), three luminosity sensors, radiation monitoring (analytical signal) and a microcontroller to manage the emission source (LED) radiation activation and radiation detection (sensors). The supervisory language was developed in LabVIEW language. The supervisory makes it possible to select which radiation is emitted by the LED, manage current signals from the sensors, and process them in an analytical measure (absorbance, using the concept of Beer's law). After testing the measurements with the prototype, was concluded that the proposed supervisory architecture proved to be adequate to manage the operation of the photometer, being possible to control the prototype's working process, steps of choosing the radiation for the measurements, monitoring the measurements in time processing of electrical signals and transformation into an appropriate analytical signal.

KEYWORDS: Control software. LabVIEW. Spectrofotometry.

1 | INTRODUÇÃO

A espectrofotometria é uma técnica analítica muito utilizada para medir a absorção ou a transmissão de luz de uma substância. Os equipamentos capazes de realizar essas medições são o espectrofotômetro e o fotômetro, “instrumentos ópticos utilizados em ampla escala em todo o mundo para medidas quantitativas na região espectral do UV-Vis” (PONTES, 2014, p.9).

A diferença entre um espectrofotômetro e um fotômetro está no tipo de fonte de luz que é emitido para realizar a medição, o espectrofotômetro mede para diferentes comprimentos de onda de luz enquanto o fotômetro utiliza um único comprimento de onda, tornando este último mais simples e assim tendo um custo relativamente menor, quando comparado aos espectrofotômetros. Em outras palavras, “a maioria dos espectrofotômetros cobre a região do UV/visível e, ocasionalmente, a região do infravermelho próximo, enquanto os fotômetros são quase exclusivamente utilizados na região do visível”. (SKOOG, 2014, p.703)

O sistema supervisório tem a função de controlar um processo e verificar todo o desempenho de um sistema físico, facilitando a visualização do todo e a identificação de erros. “São implementados computacionalmente e dotados de uma interface homem-máquina que permite a entrada de parâmetros manualmente, além de gerar relatórios e representar fielmente o processo” (TAGLIARI, 2010, p.8).

A construção de um sistema supervisório, para um fotômetro, com a finalidade de controlar a emissão de luz por um LED-RGB e obter os valores medidos pelos sensores é

apresentada a seguir.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Um fotômetro é constituído basicamente por uma fonte de luz, um suporte para colocar a substância a ser analisada e um sensor de luminosidade. Nele, a luz incide sobre a substância, onde uma parte é absorvida e a restante é transmitida para o sensor, onde a luz é convertida em um sinal elétrico e a medida é realizada. O protótipo utilizado tem como fonte de luz um LED-RGB, controlado por um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) dado por um microcontrolador de arquitetura ARM modelo LPC1769 da NXP, há um suporte para uma cubeta de vidro (1,3 x 1,3 cm), e para realização da leitura da incidência de luz há três sensores de luminosidade (um sensor LDR, um sensor analógico modelo TEMA6000 e um sensor digital modelo BH1750) também controlados pelo microcontrolador. O protótipo proposto é apresentado na Figura 1.

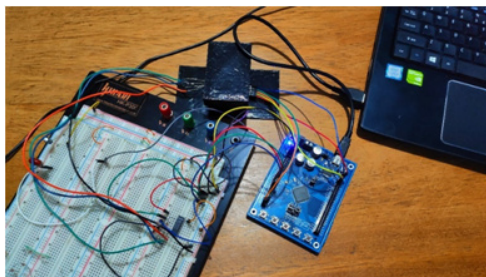


Figura 1 – Protótipo.

Fonte: Autor, 2020.

O sistema supervisor se comunica com o microcontrolador via RS-232, o supervisor será o responsável em controlar a emissão de luz pelo LED-RGB, mostrar os valores medidos pelos sensores e realizar a conversão do sinal elétrico em sinal analógico adequado (absorbância). Assim, o supervisor serve de interface de comunicação entre o usuário e o protótipo, sendo possível gerenciar e acompanhar em tempo real o funcionamento do fotômetro. Na Figura 2, é apresentado o diagrama de funcionamento do sistema.

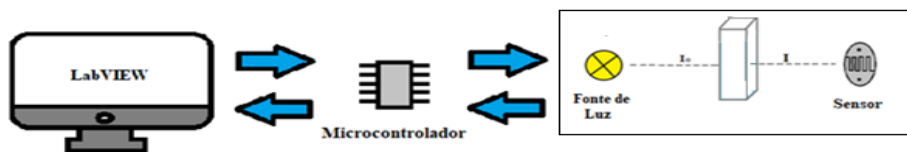


Figura 2 – Diagrama do sistema.

Fonte: Autor, 2020.

O *software* escolhido para elaboração do sistema de supervisão foi o LabVIEW, que é um “*software* projetado para o rápido desenvolvimento de aplicações de engenharia que exijam teste, medição ou controle” (FERREIRA, 2019, p.26). Esse *software* é composto por um painel frontal e um diagrama de blocos, onde se localizam a interface e o código gráfico, respectivamente.

A comunicação *serial* com o microcontrolador é feita por meio dos dados *VISA* no diagrama de blocos do LabVIEW. O bloco *VISA Configure Serial Port* é o bloco responsável por iniciar essa comunicação, é nele que se especifica o tipo de porta *serial* e o *baud rate* (taxa de transferência de dados). O bloco *VISA Write* escreve os dados na porta *serial*, ou seja, ele é quem envia um *caracter* para o microcontrolador, e o bloco *VISA Read* é o bloco que lê a informação que o microcontrolador retornou. O *VISA Close* finaliza a conexão. Todos esses blocos estão na Figura 3.

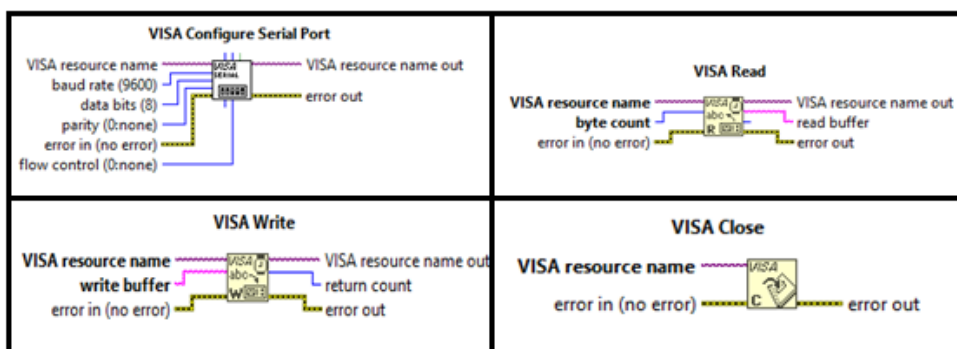


Figura 3 – Blocos *VISA*.

Fonte: NI LabVIEW (2018).

O fluxograma da Figura 4 e Figura 5 mostra o funcionamento simplificado do diagrama de blocos do programa supervisor.

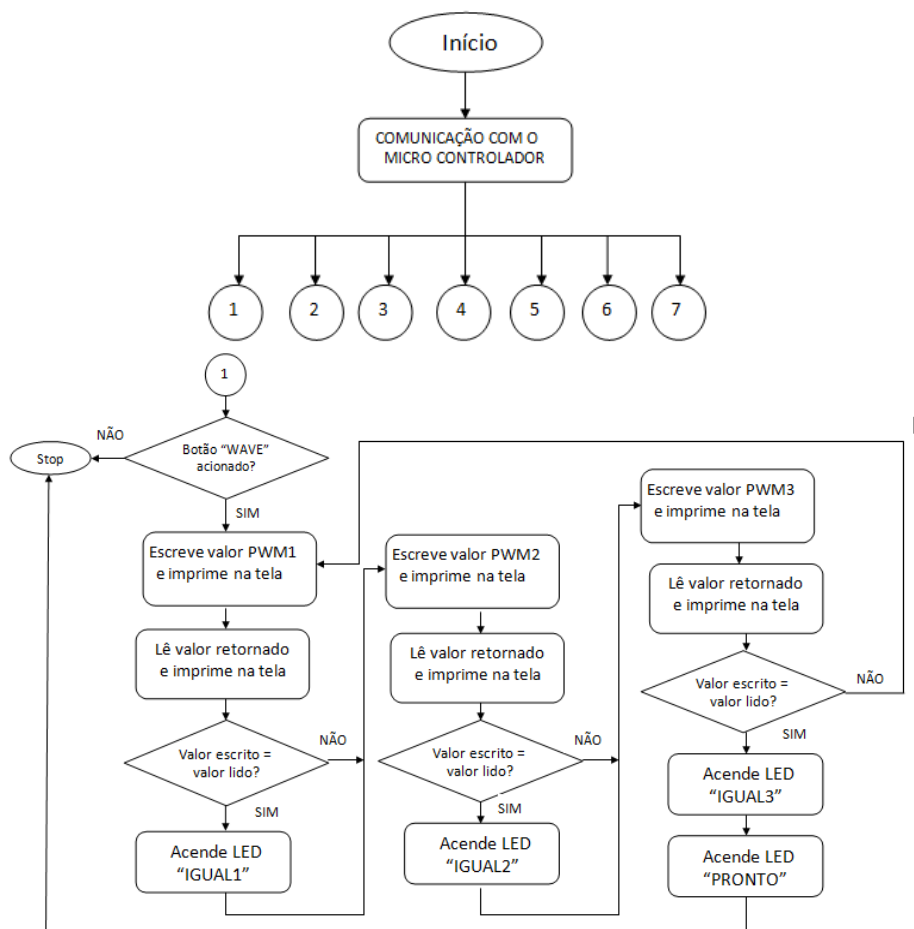
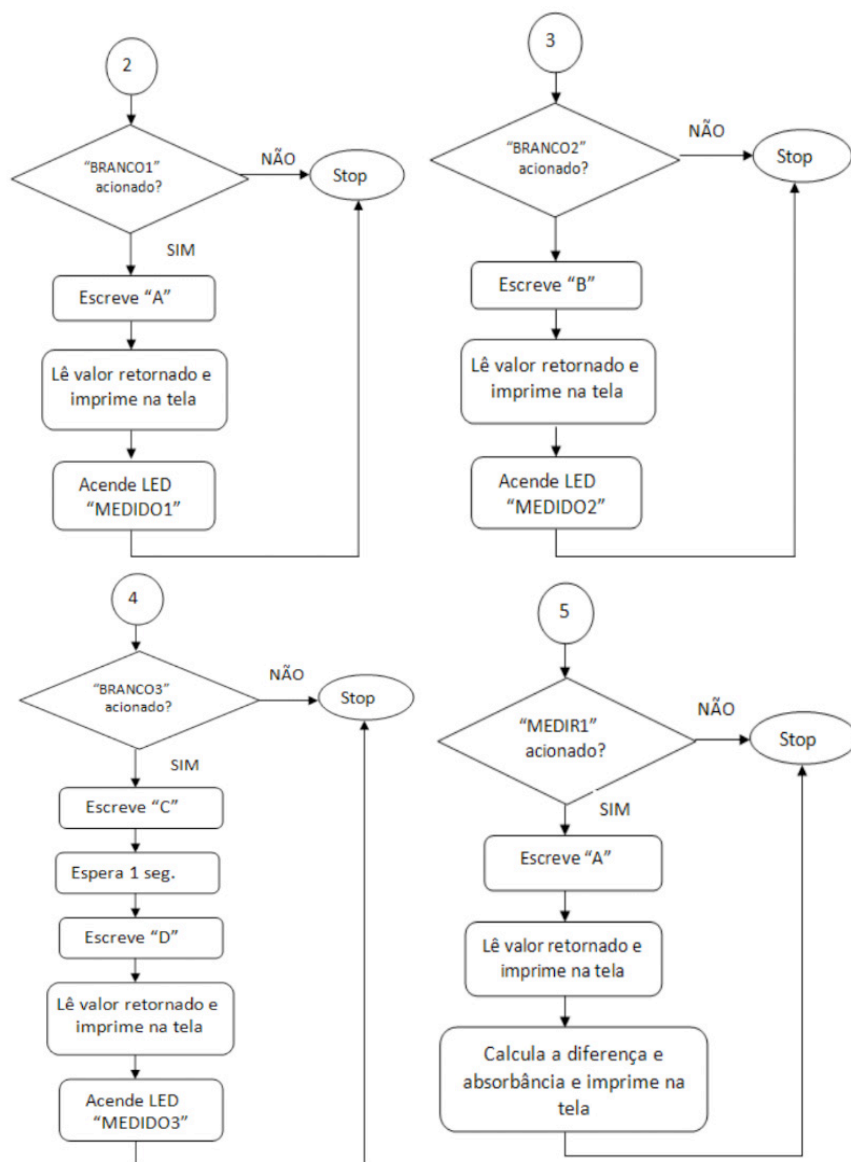


Figura 4 – Fluxograma do diagrama de blocos (parte 1).

Fonte: Autor, 2020.



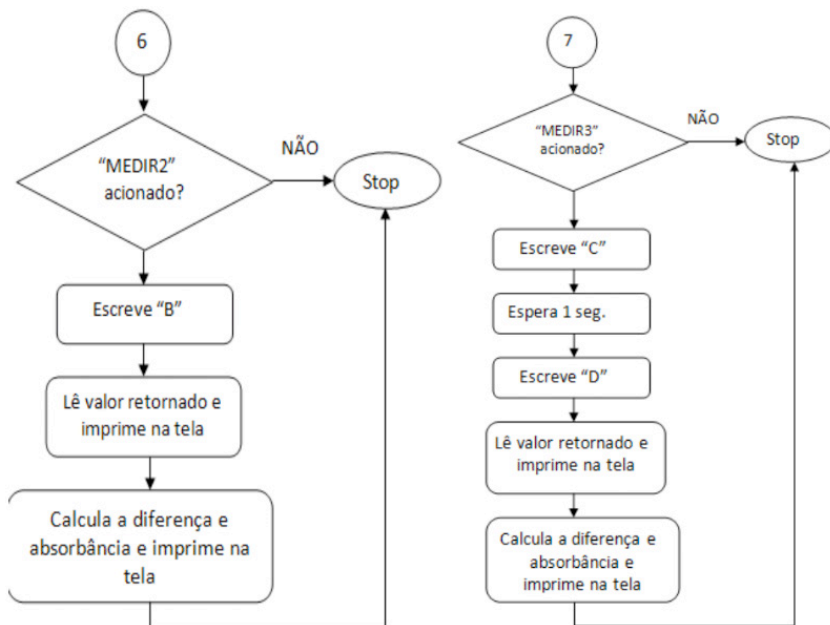


Figura 5 – Fluxograma do diagrama de blocos (parte 2).

Fonte: Autor, 2020.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *Layout* da interface do sistema supervisorio proposto é apresentada em linguagem LabVIEW, está representado na Figura 6.

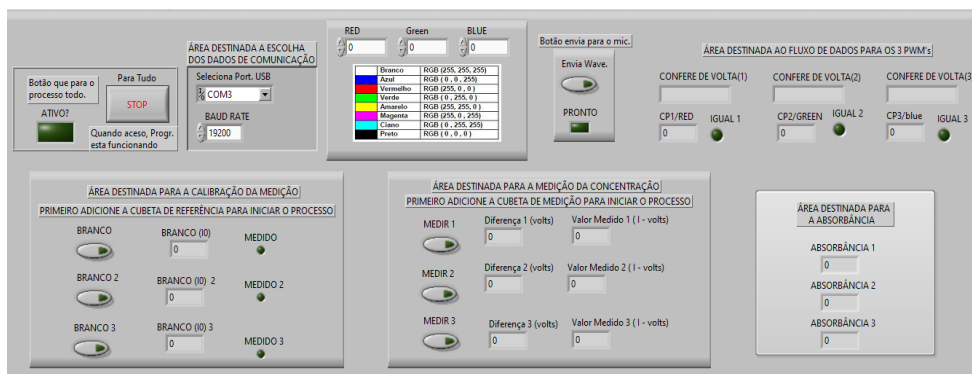


Figura 6 - Tela do sistema supervisorio no *software* LabVIEW.

Fonte: Autor, 2020.

Iniciando-se a comunicação do software com o hardware, na “ÁREA DESTINADA A ESCOLHA DOS DADOS DE COMUNICAÇÃO” seleciona-se o tipo de porta serial (depende do tipo de computador) e o baud rate, em seguida o programa pode ser inicializado. Logo que a comunicação é feita, o LED “ATIVO?” acende, e permanece aceso até o botão “STOP” ser acionado ou quando todo o processo de medição termina. Isso pode ser observado na Figura 7.

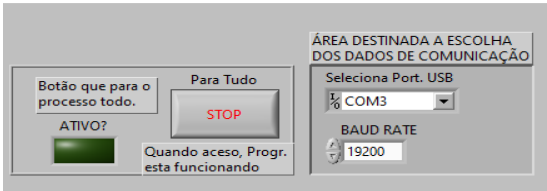


Figura 7 - Área destinada a comunicação e indicação do estado do programa.

Fonte: Autor, 2020.

Para realizar a medição, primeiro determina-se qual cor será emitida pelo LED-RGB, isso se faz na área mostrada pela Figura 8 nos campos “RED”, “GREEN” e “BLUE”. Em seguida deve-se acionar o botão “Envia Wave”. Na área destinada ao fluxo de dados para os PWM’s, também Figura 8, são indicados os valores escritos pelo supervisorio (“CP1/RED”) e os valores retornados pelo microcontrolador (“CONFERE DE VOLTA (1)”), se esses valores são iguais, o LED “IGUAL 1” acende. O processo ocorre para as três cores características do LED-RGB (vermelho, verde e azul, referente aos números 1, 2 e 3 respectivamente). O LED “PRONTO” da Figura 8 é ligado quando os 3 LEDs, “IGUAL 1”, “IGUAL 2” e “IGUAL 3” estiverem acesos.



Figura 8 - Área da determinação da cor do LED-RGB e envio de dados para PWM.

Fonte: Autor, 2020.

Em seguida adiciona-se a cubeta com o solvente no suporte, aciona-se o botão “BRANCO”, responsável por realizar a medida da luz transmitida pelo solvente que é

considerada como o I_0 . O valor fica registrado ao lado do botão, e após a medida ser analisada, o LED “MEDIDO” acende indicando que a medida foi realizada. Retira-se então a cubeta com o solvente e adiciona-se a cubeta com a solução que se deseja conhecer a concentração. Aciona-se o botão “MEDIR 1” e a medição é realizada (I). O valor fica registrado no campo “Valor Medido 1 (I - volts)”. A diferença entre I_0 e I é calculada e aparece no campo “Diferença 1 (volts)”, e a absorbância calculada aparece na “ÁREA DESTINADA PARA A ABSORBÂNCIA”, no campo “ABSORBÂNCIA 1”. Essas áreas estão ilustradas na Figura 9.

A interface de usuário é composta por três painéis principais:

- ÁREA DESTINADA PARA A CALIBRAÇÃO DA MEDIÇÃO:** Contém o subtítulo "PRIMEIRO ADICIONE A CUBETA DE REFERÊNCIA PARA INICIAR O PROCESSO". Possui três linhas de controle, cada uma com um botão "BRANCO" (com LED verde), um campo de entrada "BRANCO (I0)" com o valor "0", e um botão "MEDIDO" (com LED verde).
- ÁREA DESTINADA PARA A MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO:** Contém o subtítulo "PRIMEIRO ADICIONE A CUBETA DE MEDIÇÃO PARA INICIAR O PROCESSO". Possui três linhas de controle, cada uma com um botão "MEDIR" (com LED verde), um campo de entrada "Diferença" (valores "0", "0", "0") e um campo de entrada "Valor Medido" (valores "0", "0", "0").
- ÁREA DESTINADA PARA A ABSORBÂNCIA:** Possui três campos de entrada rotulados "ABSORBÂNCIA 1", "ABSORBÂNCIA 2" e "ABSORBÂNCIA 3", todos com o valor "0".

Figura 9 - Área destinada para medições e cálculos.

Fonte: Autor, 2020.

Realizados todos esses passos, repete-se o processo para realizar a medição com os outros sensores.

Foram realizados testes em ambiente controlado para verificar o funcionamento do sistema supervisorio com o protótipo, e comprovou-se a comunicação harmônica entre o *software* e o *hardware* e o funcionamento e gerenciamento adequado do protótipo proposto. Foi possível controlar a emissão de luz pelo LED-RGB pela comunicação com o PWM, as leituras realizadas pelos sensores foram apresentadas em tempo real, na tela do supervisorio, bem como a conversão do sinal elétrico nas medidas de absorbância (sinal analítico).

4 | CONCLUSÃO

A arquitetura proposta do sistema supervisorio se mostrou adequado para gerenciar o funcionamento do fotômetro, sendo possível controlar o processo de funcionamento do protótipo, tais como as etapas da escolha da radiação para as medidas, acompanhamento das medidas em tempo real, processamento dos sinais elétricos e transformação em sinal analítico adequado (medidas de absorbância).

REFERÊNCIAS

FERREIRA, M. H. S. **Desenvolvimento de um programa supervisor para a operação automatizada de duas unidades de processamento de pinos por atrito**, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27042/4/DesenvolvimentoProgramaSupervis%C3%B3rio.pdf>. Acesso em: 24 de ago. 2020.

PONTES, A. S. **Desenvolvimento de um fotômetro LED-Vis portátil e microcontrolador por Arduino**. 2014. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/7136/1/arquivototal.pdf>. Acesso em: 24 de ago. 2020.

SKOOG, D. A.; et al. **Fundamentos de Química Analítica**. 9 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. p. 703.

TAGLIARI, I. B. **Sistemas de supervisão de processos industriais através de computador pessoal**, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2010. Disponível em: <https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariadeControleeAutomacao/galdenoro1906/galdenoro-tg---ivan-bovarotti-tagliari.pdf>. Acesso em: 24 de ago. 2020.

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY-DEPENDENT BEHAVIOR OF GROUND ELECTRICAL PARAMETERS ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 29/01/2021

Felipe Vasconcellos

Department of Electrical Engineering
Federal University of Bahia Salvador, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/0508094462424211>

Rafael Alípio

Department of Electrical Engineering
Federal Center of Technical Education of
Minas Gerais
Belo Horizonte, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/6715701375569983>

Fernando Moreira

Department of Electrical Engineering
Federal University of Bahia
Salvador, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/8068628216980918>

ABSTRACT: This study evaluates the lightning performance of a 138 kV transmission line under the premises of constant and frequency-dependent soil electrical parameters. A wideband model was used to include the frequency-dependent impedance behavior of the tower grounding system. The overvoltages across the insulator strings were simulated using ATP and considering representative first stroke current waveforms. Backflashover outage rates were determined using the Disruptive Effect (DE) method. It was found that the decrease of soil resistivity and relative permittivity resulting from the frequency dependence effect is responsible

for the significant decrease of the expected outage rates of the tested line, in a range of 29-55% for realistic distributions of soil resistivity along the line and a consequent relevant improvement of the lightning performance of the line.

KEYWORDS: Transmission lines; grounding systems, frequency-dependent soil electrical parameters, lightning performance, backflashover.

A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO NO DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

RESUMO: Este estudo avalia o desempenho de uma linha de transmissão de 138 kV frente a descargas atmosféricas sob as premissas de parâmetros elétricos constantes e dependentes da frequência do solo. Um modelo de banda larga foi usado para incluir o comportamento de impedância dependente de frequência do sistema de aterramento da torre. As sobretensões através das cadeias de isolador foram simuladas usando o ATP e considerando as formas de onda representativas de onda de primeira corrente de retorno. As taxas de desligamento por Backflashover foram determinadas usando o método do Efeito de Disruptivo (DE). Verificou-se que a diminuição da resistividade do solo e da permissividade relativa resultante do efeito de dependência de frequência é responsável pela diminuição significativa das taxas de desligamento esperadas da linha testada, em uma faixa de 29-55% para distribuições

realísticas de resistividade do solo ao longo da linha e uma consequente melhoria relevante do desempenho da linha em termos de relâmpagos.

PALAVRAS-CHAVE: Linhas de transmissão, Sistemas de aterramento, parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência, performance frente a descargas atmosféricas, backflashover.

1 | INTRODUCTION

The incidence of lightning strikes is a frequent cause of transmission line outages. Direct discharges to the line develop overvoltages through the insulation chain that can result in insulation rupture, leading to faults [1,2]. The backflashover prevails as the main mechanism responsible for the lightning outages of lines below 500 kV installed in regions with unfavorable soil resistivity [1]. The tower-footing grounding impedance has a great influence on the amplitude of lightning overvoltages [2,3], and this is the reason for the quite usual practice of reducing this impedance to improve the lightning performance of the lines [1,2].

Several studies demonstrate how significant the influence of frequency dependence on soil resistivity and permittivity is on the lightning response of grounding electrodes [4-8]. In this scenario, it is interesting to evaluate the corresponding impact on the lightning performance of transmission lines, in terms of variation in the backflashover outage rate, and this is what this work aims to investigate.

Similar investigations can be found in other papers [9,10]. However, the application of the HEM (Hybrid Electro Magnetic Model) model to simulate the entire transmission system results in a great computational effort. Thus, this work has the goal of presenting a computationally efficient solution that allows the interface of wideband modeling of grounding systems with the Alternative Transients Program – ATP [11], in order to accurately assess the influence and impact of the frequency-dependent behavior of ground electrical parameters on the backflashover rate of transmission lines.

This paper is organized as follows: in section 2 the methodology and modeling used are briefly described, in section 3 the numerical results are presented and analyzed, and in section 4 the conclusions are exposed.

2 | METHODOLOGY AND MODELS

The simulation of the lightning overvoltages and the corresponding study of the transmission line lightning performance were carried out considering the incidence of the representative first return strikes, measured in an instrumented tower in Morro do Cachimbo - MG [12]. This study considered only the incidence of first return strikes as a function of the lower relevance of subsequent discharges in the occurrence of backflashover in lines from 138 kV onwards [13].

The Disruptive Effect (DE) method was applied to the overvoltages resulting from each simulated condition in order to calculate the value of the critical current of the first strikes capable of inducing backflashover outages [14,15]. The probability of occurrence of each critical current was calculated using cumulative peak current probability distributions. Finally, derived from the calculated probabilities and considering a wide range of soil resistivities at low frequency (values from 300 to 10,000 $\Omega\cdot\text{m}$), which are necessary to make a sensitivity analysis of the impact of the frequency dependence effect, the performance of the 138-kV line was determined considering constant and frequency-dependent soil electrical parameters.

For this purpose, three towers with two 400 m spans of a 138-kV line were considered, with the lightning striking the top of the central tower. To avoid voltage wave reflections, the ends of the lines are perfectly matched in the whole frequency range using infinitely long lines. The silhouette of the tower and the line cable heights (in meters) are illustrated in Fig. 1 (half span values are shown in brackets). The transmission line has one ACSR conductor per phase, LINNET code, and a 3/8" EHS shield wire. A pair of adjacent towers (identical to Fig. 1) is included in the simulations to consider the propagation effects of overvoltage waves on the line conductors as well as reflections occurring in the adjacent spans.

Fig. 2 shows the typical grounding arrangement of the studied transmission towers. It consists of 4 counterpoise cables, buried at 0.5 m depth, with a 7 mm radius, and each one starting from a tower "foot". The length L of the counterweight cables is selected according to the soil resistivity value, considering common practices of Brazilian energy concessionaires, as shown in Table I [16].

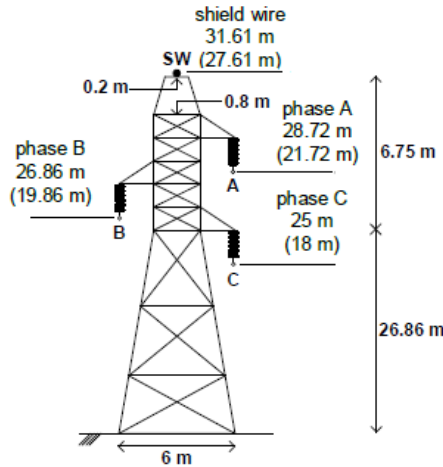


Fig. 1. Typical tower silhouette.

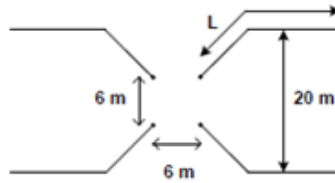


Fig. 2. Typical arrangement of tower-footing grounding electrodes.

ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	1,000	3,000	5,000	10,000
L (m)	40	60	80	130

TABLE I - Counterpoise cable length according to soil resistivity

The simulations presented in this work were developed in ATP. The advantage of using this type of tool is in its low computational effort when compared to tools that use electromagnetic fields approach, and still maintain adequate precision, especially when dealing with engineering applications [17].

In this work, the effects associated with the soil ionization process were neglected, as this effect is significant only when large values of lightning currents are applied on short electrodes, different from the frequency dependence effect, which is independent of the amplitude of the current and the length of the electrodes. According to the usual protection practices in transmission lines, long electrodes are used to achieve low values of ground resistance of tower “foot” resulting in a low linear density of dispersed current along with these [18].

The modeling guidelines of the simulated power system is then briefly described.

A. Lightning Current Waveform

A proper evaluation of lightning effects on power systems relies upon, among other factors, on an appropriate representation of the lightning current waveform since the quality of the simulation results depends on the representativity of the assumed lightning current waves.

According to [19], the first stroke currents are characterized by a pronounced concavity at the front and by the occurrence of multiple peaks, being the second peak usually the highest one, and the maximum steepness occurring near the first peak according to measurements of instrumented towers, such as those presented in [12,20].

Considering the previous aspects, the simulations were performed considering some Brazilian conditions, as the current waveform depicted in Fig. 3, that approximately reproduces the main median parameters of first strokes measured at Morro do Cachimbo Station. As detailed in [21], the waveform of Fig. 3 is obtained by a sum of Heidler functions.

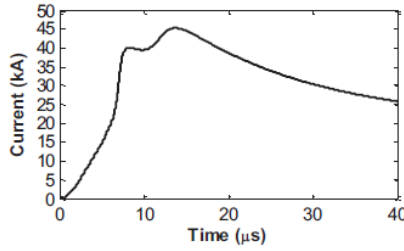


Fig. 3. Representative lightning current waveform of first strokes measured at Morro do Cachimbo Station.

B. Phase Cables and Shield Wire

For modeling the transmission line conductors, the model developed by J. Marti [22], which is implemented in the ATP, was used. In this platform, the JMarti model of the line is implemented via routine Line and Cable Constants (LCC) whose data input corresponds, essentially, to the geometric positions of the line conductors and the electromagnetic characteristics of the conductors involved (air and ground).

This model was adopted in the simulations because it considers the variation of the longitudinal parameters of the line with the frequency. In the simulations, the adjustment of these longitudinal parameters was considered for the frequency range between 1 Hz and 10 MHz, covering all the frequency content of the incident discharges. The modal transformation matrix was calculated in the frequencies of 200 kHz and 1.2 MHz for first and subsequent strikes, respectively (due to their front times).

C. Transmission Line Tower

The transmission tower is modeled as a lossless single-phase transmission line, and its surge impedance is calculated using the revised Jordan's formula, that was extended in [23] to consider vertical multiconductor systems. Assuming that the tower can be represented by n vertical conductors that are connected at the same current injection point, it is possible to model the whole multiconductor system as a single transmission line with equivalent surge impedance given by [23]

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \dots + Z_{1n}}{n} \quad (1)$$

where

$$Z = 60 \left[\ln \frac{4h}{r} - 1 \right] \quad (2)$$

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (3)$$

In (2) and (3), h is the height of the conductor, r is the conductor radius, and d_{ij}

corresponds to the distance between the center of the conductors i and j . Particularly, the tower of Fig. 1 was sectioned in four segments, each one represented by four vertical conductors. The lower part of the tower was represented as a cascade of three transmission lines (two of 9 m and one of 8.86 m), while its upper part was represented as a single 6.75-m long transmission line. This was made to consider the variation of the cross section of the tower with position, which changes the mutual surge impedance as a function of height. The equivalent impedance of each tower section was computed using (1), (2) and (3), considering the average distances between tower conductors and assuming $r = 6.5$ cm. The propagation speed of the surge wave was assumed to be 80% of speed of light, as in [23]. The final tower model is illustrated in Fig. 4.

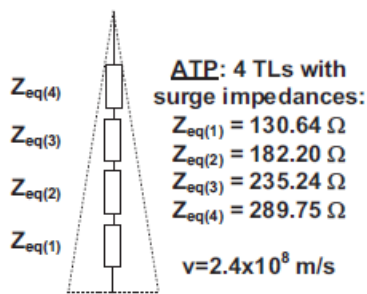


Fig. 4. Transmission tower model.

D. Tower-footing Grounding

The rigorous modeling of the tower-footing grounding system has an essential function in the physical consistency of the impulsive behavior of this system and the determination of the overvoltages developed through the insulator chains of the transmission lines by the incidence of lightning strikes in the shielding cable or directly at the top of the tower [18]. These strikes have associated currents that are often defined by a frequency content from zero to Mega-hertz, in which the tower-footing grounding system reveals a different behavior in different frequency ranges [24].

Therefore, the adequate evaluation of the lightning overvoltages and consequently the performance of a transmission line is not possible unless the wideband frequency behavior of the grounding system impedance is adequately taken into account [25]. However, this is not a simple task, considering that the procedure for including the wideband model of the grounding systems in the determination of the impulse response is not well established in numerical simulators of electromagnetic transients, such as ATP.

In this work, the ground conductors were represented using a transmission line model composed of an L inductance in series, and a G conductance and a C capacitance in parallel. They can be modeled as 'pi-equivalent' circuits connected in series with distributed

R-L-C elements, where each 'pi-equivalent' circuit corresponds to a small segment of the ground conductor [26], as illustrated in Fig. 5.

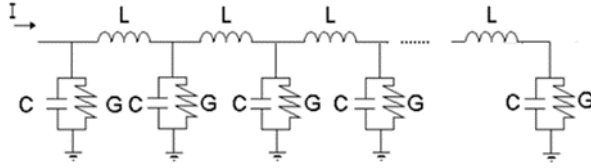


Fig. 5: Representation of the ground conductor. Adapted from [26].

An adaptation of the original model was made, in which the internal resistance of the cable was neglected, as it was included as a direct current resistance in the 'pi' cell serial branch, which is not physically consistent at high frequencies. It is worth mentioning that even the internal resistance in alternating current, considering the skin effect, is insignificant concerning to the grounding impedance. This can be concluded, since the transversal resistance of the soil is infinitely greater than the internal resistance of the cable, after all the resistivity of the soil is always extremely greater than that of the grounding electrode, assuming that it is manufactured using conductive material.

The R-L-C parameters of 'pi-equivalent' circuits are calculated using (4), (5) and (6), based on the well-known Sunde [27] expressions:

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right], (l \gg a, d \ll l) \quad (4)$$

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right] \quad (6)$$

where ρ ($\Omega \cdot m$) is the soil resistivity, l (m) is the length of the electrode, a (m) is the radius of the electrode, d (em m) is the depth at which the counterpoise cable is buried, ϵ is the soil permittivity (F/m) and μ (H/m) is the soil permeability.

To include the frequency-dependent behavior of the grounding system impedance, the harmonic impedance $Z(j\omega)$ of the arrangement shown in Fig. 2 was calculated in a frequency range of 1 Hz to 10 MHz. This parameter is useful to evaluate the performance of a grounding system independently of the characteristics of the injected lightning strike current and is defined as:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \quad (7)$$

Where $V(j\omega)$ and $I(j\omega)$ are the potential at the injection point and the injected current, respectively.

The impedance of the tower grounding system is calculated using two different approaches, both using the wideband model, one with constant electrical parameters in the ground and the other considering its frequency dependence, using (8) and (9), based on a large number of field measurements, Kramers-Kronig's causal relationships and Maxwell's equations [28]:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^y \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right) \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1\text{MHz})^y} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{y-1} \quad (9)$$

In (8) and (9), σ is the soil conductivity (mS/m), σ_0 is the low frequency (100 Hz) conductivity (mS/m), ε_r is the relative permittivity, $\varepsilon_{r\infty}$ is the relative permittivity at higher frequencies, ε_0 is the vacuum permittivity ($\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$) and f is the frequency in Hz. The parameters, $\varepsilon_{r\infty} = 12$, $y = 0.54$ and $h(\sigma_0)$ in (10), are recommended to obtain average results for the frequency dependence of the soil parameters [28]:

$$h(\sigma_0) = 1.26 \times \sigma_0^{0.73} \quad (10)$$

It is worth mentioning that the physical consistency of these expressions to determine the frequency dependence of soil parameters was provided by experimental results [5,28].

The rational model that approximates the frequency response to $Z(j\omega)$ harmonic impedance is obtained using the Vector Fitting technique proposed by Gustavsen & Semlyen [29]. The vector fitting algorithm implemented in MATLAB® is public domain and available online [30]. This routine was used to adjust the grounding admittance in the frequency range between 1 Hz and 10 MHz in all cases of this work. From the rational model, an equivalent circuit is synthesized using the routine `netgen.m` developed by Gustavsen [30], and this circuit is exported in a text file that can be easily inserted into the ATP.

E. Insulation Breakdown

The disruptive effect method (DE method) is applied to determine whether or not the line insulation breakdown. The DE method concept is based on the idea of the existence of a critical disruptive effect DE_c for each isolator configuration. Each non-standard voltage surge has an associated disruptive effect (DE). If this DE value exceeds the critical value, a disruptive discharge occurs, which causes the insulation to break [15]. The disruptive effect associated with a voltage waveform is determined by:

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (11)$$

where $e(t)$ corresponds to the voltage waveform applied over the insulator chain, V_0 refers to the voltage threshold from which it has begun the process of rupture in the insulator, t_0 is the instantaneous value of $e(t)$ exceeds V_0 , k is a no-dimensional factor, and DE is the variable called "disruptive effect". For a typical 138 kV line, DE method constants

can be obtained according to Hileman [15]: $DE_c = 1.1506(CFO)^k$; $k = 1.36$; $V_0 = 0.77CFO = 500.5$ kV.

3 | RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Transmission Line Overvoltages

The simulations were performed considering the incidence of the current in Fig. 3, the tower configuration in Fig. 1 and the grounding system arrangement in Fig. 2, and spans of 400 m in length as described in Section II.

The overvoltages developed through the upper insulator chain (phase A) of the 138 kV line due to the incidence of a lightning strike at the top of the tower are shown in Fig. 5. It was decided to present only the graphs and values corresponding to phase A because it was the phase that presented the highest overvoltage values in all the cases studied, thus being the most relevant for the protection design, besides providing a less polluted graphical representation.

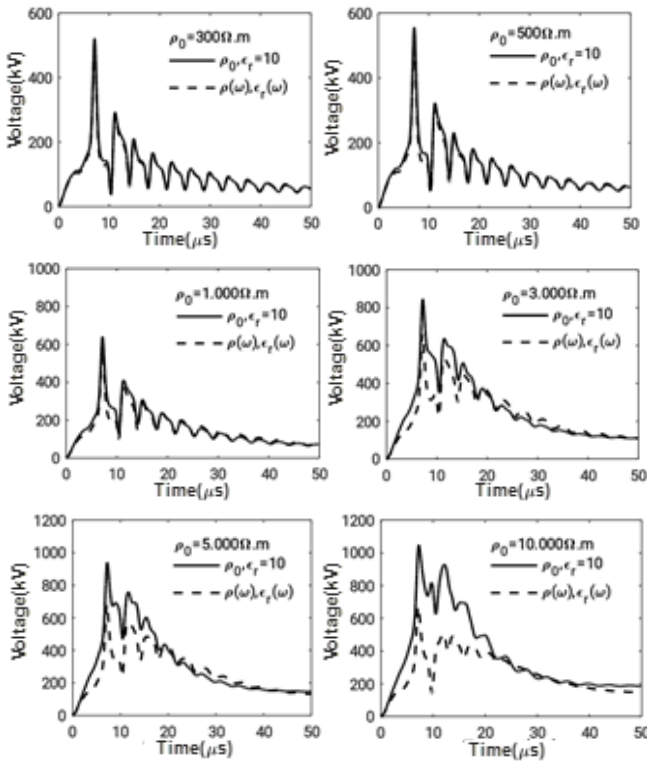


Fig. 5 Simulated overvoltages considering constant and frequency-dependent soil parameters.

The results show that the frequency dependence of soil parameters does not significantly affect the peak of overvoltages for soils of resistivity up to 500 $\Omega\cdot\text{m}$, but becomes important from this value. This is consistent with the results obtained in other studies, which even use diverse modeling [4,10].

Table II clearly shows the impact of the frequency dependence effect of the soil electrical parameters on the peak overvoltage waves of Fig. 5. It can be observed that the reduction of the overvoltage peak (Δ) is significant, being approximately 11% to 34% for ρ_0 ranging from 1,000 to 10,000 $\Omega\cdot\text{m}$.

Insulator Chain A Overvoltages (kV)				
ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$)	L (m)	$\rho=\rho_0,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
300	20	522	501	-4.0%
500	30	556	522	-6.1%
1,000	40	641	572	-10.8%
3,000	60	846	660	-22.0%
5,000	80	942	682	-27.6%
10,000	130	1050	693	-34.0%

TABLE II - Peak values of simulated overvoltages considering constant and frequency dependent electrical soil parameters.

B. Critical Currents

For a given set of line conditions and defined current waveform, it is possible to easily identify the critical peak current that leads to the insulator chain breakdown. With the current waveform maintained, it is sufficient to increase its value until the peak current corresponding to the overvoltage amplitude required to reach the breaking condition is found. Fig. 6 illustrates the procedure for determining the critical peak current of a representative first-return strikes.

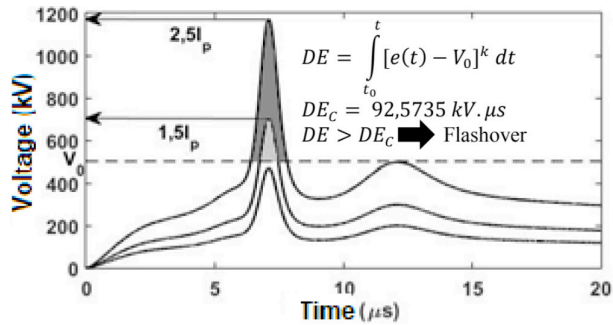


Fig. 6. Application of the DE method to evaluate the backflashover condition.

It can be seen in Fig. 5 that for soil resistivity values above 1000 $\Omega \cdot m$, the frequency dependence effect decreases not only the peak voltage but also the instantaneous voltage values over an interval after the peak and until the two curves stabilize. This may be relevant for reducing the value resulting from integration when using the DE method to evaluate the backflashover condition.

To quantify this effect, the DE method was applied to the overvoltage curves obtained through each soil resistivity condition to determine the peak value of the critical current I_c , under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters. The I_c corresponds to a threshold, i.e. currents above it lead the line insulators to breakdown.

The calculated values of I_c are shown in Table III, together with the percentage of peak currents that exceed the critical value ($I_p > I_c$), determined from the cumulative probability distribution of peak currents for first return discharges measured at the Morro do Cachimbo - MG station [12], which is approximately $P_f = 1/[1+(I/45,3)^{3,9}]$. When considering the effect of frequency dependence of soil parameters, the critical currents I_c are increased in all cases, and this increase becomes more significant with higher values of soil resistivity. Thus, the percentage of peak currents higher than I_c (events that lead the line to insulation breakdown) is decreased, as indicated by Δ . The impact of the effect is significant even in soils of low resistivity, starting from approximately 18% for soils of 300 $\Omega \cdot m$ and reaching 66% for soils of 10,000 $\Omega \cdot m$.

Peak and Probability of Critical Currents Occurrence						
ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	L (m)	$\rho=\rho_0, \varepsilon_r = 10$		$\rho=\rho(\omega), \varepsilon(\omega)$		$\Delta(\%)$
		I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	
300	20	113	2.8%	119	2.3%	-17.6%
500	30	103	3.9%	111	2.9%	-24.0%
1,000	40	81	9.4%	92	5.9%	-36.2%
3,000	60	51	38.7%	65	19.7%	-49.6%
5,000	80	43	55.1%	59	26.3%	-53.5%
10,000	130	36	71.0%	57	29.0%	-66.0%

TABLE III - Critical Current Peaks and Occurrence Probabilities calculated considering constant and frequency dependent ground electrical parameters.

C. Backflashover Outage Rate

The evaluation of the impact of the frequency dependence of soil parameters on the rate of backflashover transmission line disconnection was developed following a procedure similar to that indicated by Anderson [31]. The proposed methodology requires certain preliminary definitions/information to be applied, such as the density of atmospheric discharges (N_g) along the line to be studied, the geometry of its towers and a set of soil resistivity values to be analyzed, covering a distribution of values found along with the soil resistivity of the regions that the line is installed.

$N_g=10$ was used because it is an average value found in the state of Minas Gerais, where the Morro do Cachimbo station is also located. Besides this, another important parameter is the number of discharges that strikes a transmission line per 100 km per year (), which is defined by the following expression [32]:

$$N_S = N_g \times \left(\frac{28h^{0.6+b}}{10} \right) \quad (12)$$

where h (m) is the tower height and b (m) is the distance between the shield wire of the towers. The division by “10” occurs to convert units, because N_g is measured in strikes/km²/year and h and b in meters.

When calculating the backflashover rate, only lightning strikes that directly affect the tower are considered. In an empirical way, it is assumed that 60 % of the discharges that reach a transmission line affect directly the towers [33,34]. Thus, the number of lightning strikes that hit the tower of a line (N_T) is given by (13):

$$N_T = 0,6 \times (N_S) \quad (13)$$

where (N_S) is the number of lightning strikes hitting a transmission line per 100 km

per year.

Finally, the backflashover rate (N_{BF}) can be calculated. In (14) is defined the calculation N_{BF} (number of backflashover outages per 100 km of line per year), represented below:

$$N_{BF} = \frac{N_T}{100} \times P[I \geq I_c] \quad (14)$$

where $P[I \geq I_c]$ is the probability that a lightning strike current is greater than the minimum lightning current enough to lead the transmission line outage. The division by “100” into (14) is to transform the value of the probabilities ($P[I \geq I_c]$) from percentage to p.u.

Based on the critical current probabilities in Table 4, the expected backflashover rates have been calculated under the assumption of constant and frequency-dependent ground parameters.

The analysis considers nine different soil resistivity distributions along the line: six uniform distributions (ρ_o from 300 to 10,000 $\Omega \cdot m$) and three non-uniform distributions, these represent different soil conditions along the line, thus being more realistic. Of these three, one predicts only soils of low to moderate resistivity (not including samples above 1,000 $\Omega \cdot m$), another predicts soils of moderate resistivity (samples of all resistivity values included, most often soils with resistivity of 500 and 1,000 $\Omega \cdot m$), and the latter predicts soils of high to extremely high resistivity (no samples below 3,000 $\Omega \cdot m$).

Considering the uniform distributions, the results of Table 4 show that frequency dependence causes a strong decrease in backflashover rates in all cases, from 20% to approximately 60%.

The estimated rates (per 100 km per year) under the hypothesis of constant soil parameters vary from 1 to 26, which demonstrates the sharp growth as the soil resistivity is increased.

This reduction is also significant for non-uniform distributions. Considering the shutdown rates of 2.1; 7.6 and 19.5 (for soil resistivity conditions from low to moderate, and high to extremely high) are reduced by 28.6%, 50%, and 54.4%, respectively, due to the frequency dependence effect.

Table IV summarizes the results reported above and indicates the reduction in expected shutdown rates (Δ).

Hypothesis of ρ_o along the transmission line (%)						N_{BF} (outages/100 km/year)		
300 ($\Omega \cdot m$)	500 ($\Omega \cdot m$)	1,000 ($\Omega \cdot m$)	3,000 ($\Omega \cdot m$)	5,000 ($\Omega \cdot m$)	10,000 ($\Omega \cdot m$)	$\rho = \rho_o$, $\epsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega)$, $\epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
100%	0%	0%	0%	0%	0%	1	0,8	-20,0%
0%	100%	0%	0%	0%	0%	1,4	1,1	-21,4%
0%	0%	100%	0%	0%	0%	3,4	2,2	-35,3%
0%	0%	0%	100%	0%	0%	14,1	7,2	-48,9%
0%	0%	0%	0%	100%	0%	20,2	9,6	-52,5%
0%	0%	0%	0%	0%	100%	26	10,6	-59,2%
30%	30%	40%	0%	0%	0%	2,1	1,5	-28,6%
10%	30%	30%	10%	10%	10%	7,6	3,8	-50,0%
0%	0%	0%	40%	30%	30%	19,5	8,9	-54,4%

TABLE IV - Estimated backflashover rates considering constant and frequency-dependent soil electrical parameters and various soil resistivity distributions along the line.

From the results presented, it is clear that including the dependence on the frequency of the soil parameters can strongly affect the outage rates of the transmission lines, causing a significant improvement in their lightning performance in all the cases studied.

4 | CONCLUSIONS

The influence of the frequency-dependent effect of resistivity and soil permittivity on the lightning performance of transmission lines was evaluated and discussed. The results presented imply a significant reduction of the overvoltages of atmospheric origin of the tested line due to the dependence on the frequency of the soil electrical parameters.

The dependence on the frequency of soil parameters causes a relevant reduction in the overvoltages associated with the first-return strikes to lines installed in soils above 500 $\Omega \cdot m$. This results in a significant increase in the peak values of critical currents, leading to a consequent reduction in the probability of backflashover outages.

It was found that the frequency dependence of soil parameters affects very significantly backflashover rate of the studied line for the whole range of resistivities of the studied soil. As the resistivity is increased, the impact becomes more pronounced. Considering the non-uniform, and more realistic, soil distributions indicated in Table 4, reductions in expected shutdown rates of about 28% to 54.4% were found.

The results presented demonstrate a significant improvement in the performance of the line tested against atmospheric discharges due to the dependence on the frequency of the soil electrical parameters, and attribute a certain generality to the impact of this effect on transmission lines.

From these conclusions, it is clear the importance of including the frequency-dependent effect of soil resistivity and permissiveness in the performance assessments

against atmospheric discharges of transmission lines that cross regions with soil resistivity above 500 $\Omega \cdot m$.

REFERENCES

- [1] Visacro, S.. "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines". J. Light. Res., vol. 1, pp. 60–68, 2007.
- [2] S. Visacro, F. H. Silveira and A. De Conti, "The Use of Underbuilt Wires to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 1, pp. 205-213, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2168546
- [3] W. A. Chisholm, Y. I. Chow and K. D. Srivastava, "Lightning Surge Response Of Transmission Towers," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232-3242, Sept. 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.318134.
- [4] S. Visacro, M. H. Murta Vale, M. B. Guimarães N., R. A. Araújo, W. L. F. Pinto and R. S. Alípio, "The response grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent resistivity and permittivity of soil," 2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICLP.2010.7845936.
- [5] S. Visacro and R. Alípio, "Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927-935, April 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179070.
- [6] R. Alípio and S. Visacro, "Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 1, pp. 132-139, Feb. 2013, doi: 10.1109/TEMC.2012.2210227.
- [7] M. Akbari, K. Sheshyekani and M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 4, pp. 739-746, Aug. 2013, doi: 10.1109/TEMC.2012.2222416.
- [8] R. Alípio and S. Visacro, "Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 5, pp. 1163-1171, Oct. 2014, doi: 10.1109/TEMC.2014.2313977.
- [9] S. Visacro, F. H. Silveira, S. Xavier and H. B. Ferreira, "Frequency dependence of soil parameters: The influence on the lightning performance of transmission lines," 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344274.
- [10] S. Visacro and F. H. Silveira, "The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 3, pp. 434-441, June 2015, doi: 10.1109/TEMC.2014.2384029..
- [11] Prikler, L. and Hoidalén, H.K. ATPDraw Manual, Version 5.6, 2009.

- [12] Visacro, S., Soares, A., Schroeder, M.A.O., Cherchiglia, L.C.L. and Sousa, V.J. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station, J. Geophys. Res., vol. 109, pp. 1–11, 2004.
- [13] F. H. Silveira, S. Visacro, A. De Conti and C. R. d. Mesquita, “Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Strokes,” in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 54, no. 2, pp. 316–322, April 2012, doi: 10.1109/TEMC.2011.2181851.
- [14] M. Darveniza, “The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shapes-a theoretical basis,” in IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 23, no. 3, pp. 373–381, June 1988, doi: 10.1109/14.2377.
- [15] Hileman, A. Insulation Coordination for Power Systems. CRC Press, pp. 627–640, 1999.
- [16] ENERGISA. NTU 004 - CRITÉRIOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO, 2017.
- [17] Geri, A. & Visacro, S.F.. (2002). Grounding systems under surge conditions: Comparison between a field model and a circuit model. Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection. 411-416.
- [18] S. Visacro, “A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.876707.
- [19] S. Visacro, “A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke” Geophysical Research Letters, vol. 31, L07112, Apr. 2004.
- [20] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, “Parameters of lightning flashes,” Electra, no. 80, pp. 223–237, 1975.
- [21] A. De Conti and S. Visacro, “Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms,” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.
- [22] J. R. Marti, “Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, Jan. 1982.
- [23] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. A. O. Schroeder, “Revision, extension and validation of Jordan’s formula to calculate the surge impedance of vertical conductors,” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 48, no. 3, pp. 530–536, Aug. 2006.
- [24] IEEE. IEEE Std. 142 - Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).
- [25] Alemi, M. R. and Sheshyekani, K. “Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines”. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 57, no. 6, pp. 1627–1636, 2015.

[26] Lorentzou, M. I., Hatziaargyriou, N. D., and Papadias, B. C. "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response". IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 517–524, 2003.

[27] Sunde, E. D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. 2nd ed. New York: Dover, 1968.

[28] Alipio, R and Visacro, S. "Impulse Efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 2, pp. 716–723, 2014.

[29] Gustavsen, B. and Semlyen, A. "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting". IEEE Trans. Power Del., vol. 14, pp. 1052–1061, 1999.

[30] Gustavsen, B. Matrix Fitting Toolbox [Online]. Available: <https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/>, 2009.

[31] Anderson, J. G. (1982). Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition, chapter 12. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

[32] IEEE (1997). IEEE Std. 1243 Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines.

[33] Grant, I. S, Anderson, J.G. and Hileman, A.R. (1985), A Simplified Method For Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932.

[34] Anderson, J. G., Clayton, R., Elahit, H. et al. (1993). Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models, IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267.

BANCADA EXPERIMENTAL PARA TESTE DE CONTROLADORES PRIMÁRIOS EM MICRORREDES

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 05/01/2021

João Pedro Magalhães Fernandes

Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA
Alegrete – RS

<http://lattes.cnpq.br/5771304100581206>

Márcio Stefanello

Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA
Alegrete – RS

<http://lattes.cnpq.br/9333498570249062>

RESUMO: Na pesquisa e desenvolvimento envolvendo processamento de energia por meio de conversores eletrônicos de potência, a validação experimental de controladores é fundamental. Um exemplo são as aplicações envolvendo a integração de unidades de geração distribuída em microrredes de energia. As particularidades desta aplicação impõem requisitos de robustez e desempenho do sistema como um todo, não apenas dos algoritmos de controle, mas também da instrumentação utilizada, dos circuitos para proteção e manobra e da lógica de proteção. Neste capítulo é descrito um controlador baseado no princípio da máquina síncrona virtual a fim de operar as unidades de geração de modo estável quando diferentes unidades são interconectadas. Uma microrrede em escala reduzida é então simulada e por fim são descritos os aspectos técnicos usados para implementar a bancada experimental que será usada para a validação de controladores

primários para conversores em microrredes.

PALAVRAS-CHAVE: Microrrede, Recursos distribuídos de energia, Bancada experimental.

EXPERIMENTAL BENCH FOR TESTING OF PRIMARY CONTROLLERS IN MICROGRIDS

ABSTRACT: In research and development involving energy processing by power electronic converters, the experimental validation of controllers is necessary. Such an example are applications involving the integration of distributed energy resources within microgrids. The characteristics of this application impose requirements of robustness and performance of the system as a whole, not only of the control algorithms, but also of the instrumentation used, the circuits for protection as well and the logic for protection. In this chapter is described a controller based on the principle of the virtual synchronous machine in order to operate the distributed energy resources in a stable manner when different units are interconnected. A reduced scale microgrid is then simulated and finally are described the technical aspects used to implement the experimental bench used for the validation of primary controllers for converters in microgrids.

KEYWORDS: Microgrid, Distributed energy resources, Experimental bench.

1 | INTRODUÇÃO

O sistema elétrico foi concebido originalmente baseado na geração centralizada com grandes geradores síncronos. A energia é

então transmitida em alta tensão e distribuída para as cargas elétricas em média ou em baixa tensão. Entretanto, existe a tendência no uso crescente de recursos distribuídos de energia ou DER's (do inglês, *Distributed Energy Resources*), principalmente os renováveis, devido à crescente demanda atual por energia elétrica e a fatores ambientais. Grupos motor-gerador movidos à combustíveis fósseis, painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas são as DERs mais utilizadas. As fontes renováveis fotovoltaica e eólica têm experimentado um rápido desenvolvimento tecnológico, o que contribuiu para sua proliferação em várias partes do mundo. O uso de DERs possui como outra vantagem o abastecimento de energia em locais remotos e áreas rurais. Estima-se que 14% da população mundial não possui acesso à energia elétrica. Por esses motivos, a integração de DERs no sistema elétrico tem sido apoiada por governos de diversos países, principalmente as DERs renováveis.

O processamento de energia de DERs é realizado por meio de conversores eletrônicos de potência e a integração de diferentes DERs pode ser realizada por meio de microrredes (MRs). Uma microrrede é definida como uma parte da rede elétrica que inclui DERs, sistemas de armazenamento de energia e cargas. Uma MR possui limites elétricos definidos e pode operar conectada ao sistema elétrico principal ou então operar isolada, alimentando cargas localmente (IEEE, 2017). O desenvolvimento do conceito de MRs é mais relacionado com a penetração de DERs renováveis, como eólicos e fotovoltaicos. Com o advento das MRs, o usuário passa a ter a possibilidade técnica de integrar a rede elétrica, auxiliando na regulação da tensão e frequência.

Um dos maiores desafios para a operação de MRs é realizar o controle dos conversores eletrônicos de modo estável e garantindo a operação adequada do sistema em termos de tensão e frequência, incluindo também a capacidade de processamento de referências de potências ativa e reativa com base em referências recebidas de controladores secundários e terciários.

Quando DERs renováveis são integrados no sistema elétrico convencional, a intermitência inerente destes sistemas causa flutuações na energia disponível, mas que são compensadas pelos geradores síncronos convencionais, devido a energia acumulada na inércia dos seus rotores. Entretanto, considerando a expansão da energia baseada em DERs, é necessário que os conversores que processam esta energia sejam controlados adequadamente a fim de não comprometer a resiliência e a estabilidade do sistema elétrico de potência. Em virtude disso, há a necessidade de buscar soluções de controle para conversores em geração distribuída. Uma possibilidade é controlar os conversores de maneira que eles tenham um comportamento dinâmico similar ao de um gerador síncrono real. Essa abordagem deu origem ao conceito da máquina síncrona virtual. Uma das máquinas virtuais mais difundidas é denominado de *Synchronverter* (ZHONG; WEISS, 2011) que será descrito e simulado usando a ferramenta computacional Typhoon HIL Control Center. Por fim, será descrita implementação de uma bancada experimental completa composta por dois conversores eletrônicos de potência para a validação de algoritmos

de controle para estabilização de conversores operando em MRs. É implementado, em simulação, o controlador *Synchronverter* no software da Typhoon HIL para controlar os conversores da bancada operando em paralelo com potências distintas a fim de emular o comportamento de uma MR real.

2 | ESTRUTURA DE UMA MICRORREDE DE ENERGIA

A estrutura de uma MR de energia é mostrada na Figura 1 (IEEE, 2018). Os conversores eletrônicos de potência são usados como elementos de interface entre as DERs e o restante da MR que pode operar ilhada ou conectada ao sistema elétrico de acordo com o estado do Disjuntor principal. O controlador da MR realiza o gerenciamento de todas as unidades controláveis, DERs, elementos armazenadores de energia e cargas ajustáveis por meio de uma infraestrutura de comunicação de dados.

Em termos de controle e gerenciamento, é usual classificar os controladores em primário, secundário e terciário. Os controladores primários realizam o controle dos conversores para despacho de referências de potência ou então para manter níveis de tensão e frequência necessários, dependendo de a MR estar operando conectada ou ilhada, respectivamente. O controlador secundário fornece as referências de tensão, frequência e potência para compensar desvios nos valores destas grandezas. O nível terciário realiza o controle da MR como um todo. Com ele, é possível associar diferentes MRs formando grupos, por exemplo.

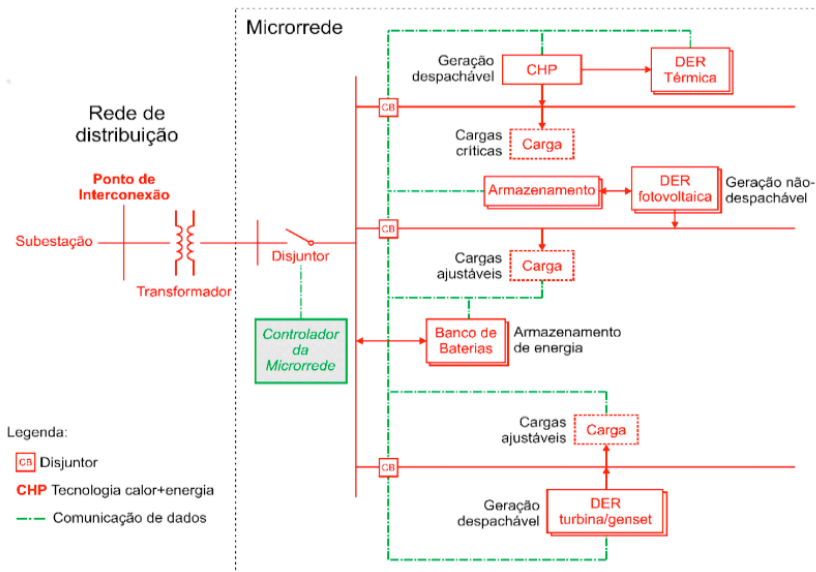


Figura 1—Diagrama esquemático de uma MR de energia.

Fonte: Autor (adaptado de IEEE Std 2030.8-2018).

Neste capítulo será abordado o controle primário utilizando o conceito da máquina síncrona virtual.

3 I SISTEMA DE CONTROLE PRIMÁRIO DE DERs

Considerando uma DER trifásica, o processamento de energia é em geral realizado por meio de um conversor eletrônico de potência modulado em largura de pulso (ou PWM) seguido de um filtro para atenuação das ondulações de alta frequência que surgem do processo de modulação. A Figura 2 mostra a parte elétrica de uma DER, assumindo que a fonte primária fornece energia por meio de um barramento CC.

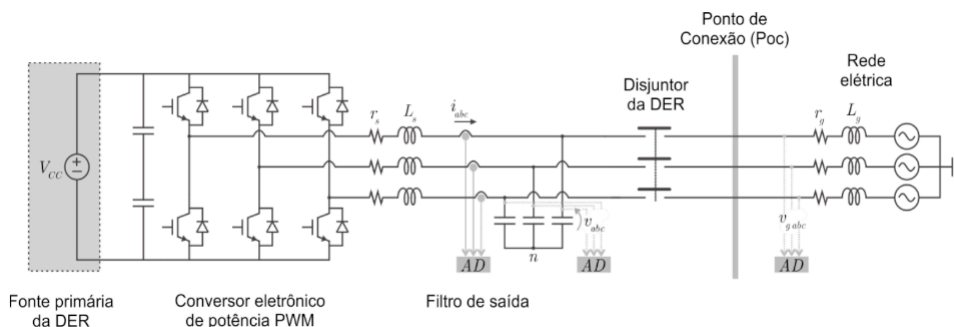


Figura 2—Conversor PWM trifásico com filtro de saída do tipo LCL.

Fonte: Autor.

Existem diferentes maneiras de controlar o conversor eletrônico para implementar o controle primário da DER. Provavelmente, uma das técnicas mais difundidas na literatura depois do controle por curvas de decaimento proposto por Guerrero, Chandorkar, Lee e Loh (2013) e o controle usando o princípio da máquina síncrona virtual por Beck e Hesse (2007). Notavelmente, a máquina virtual denominada de *synchronverter* por Zhong e Weiss (2011).

3.1 Modelagem Matemática do Synchronverter

A malha de controle do *synchronverter* implementada no software da Typhoon HIL é mostrada na Figura 3.

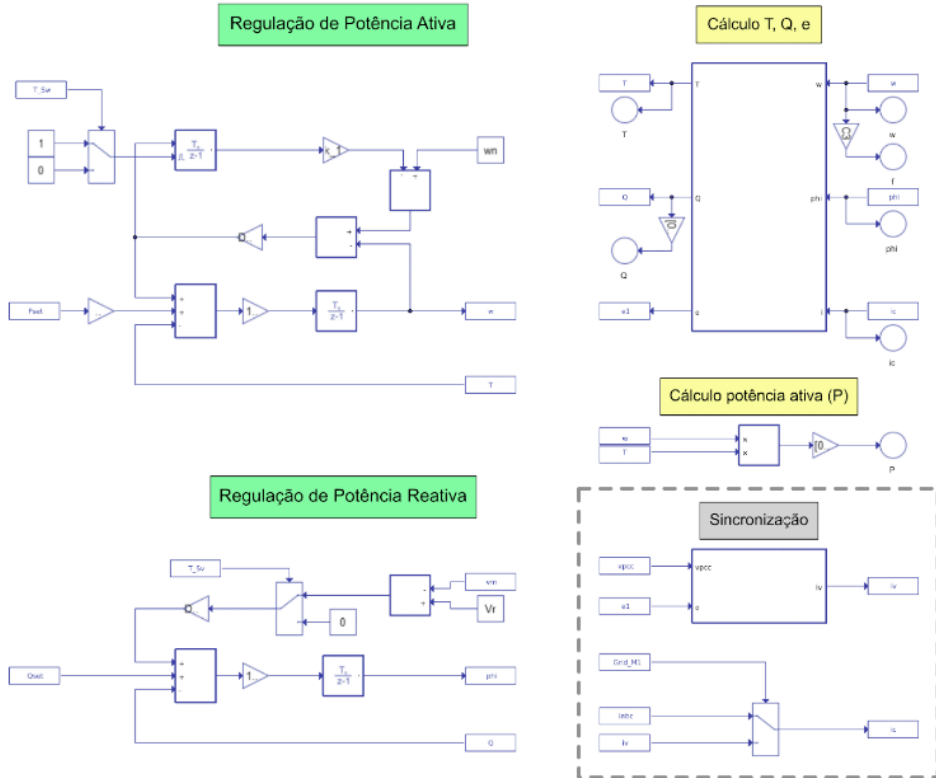


Figura 3—Malhas de controle de frequência e de fluxo do synchronverter.

Fonte: Autor.

O torque T_e e a potência reativa Q são calculados de acordo com:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = M_f i_f \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad (3.1.1)$$

$$Q = -\omega M_f i_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

As ações de controle obtidas são dadas por:

$$e_{a,b,c} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega M_f i_f \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

e serão os valores de tensão a serem modulados pelo conversor PWM.

Note que, tal como num gerador síncrono, o torque T_e se relaciona com a indutância mútua M_f da bobina de campo, com a corrente de excitação i_f do rotor e com as correntes

de fase do estator que correspondem às correntes de saída do conversor, isto é, i_a , i_b e i_c .

A malha para síntese do fluxo utiliza a potência reativa Q . Note que a dependência da frequência ω se dá pelo fato de que a tensão de saída do conversor possui amplitude $\omega M j_p$ modelando o acoplamento existente numa máquina síncrona real. O ângulo rotórico θ é obtido pela integração numérica da velocidade angular virtual.

3.2 Algoritmo de Sincronização

Antes de fechar o disjuntor da DER, é necessário sincronizá-la com a rede elétrica tal como realizado num gerador síncrono real. Os blocos usados para sincronização são destacados pelo retângulo em cinza na Figura 3. Para isso, inicialmente, o erro de tensão $V_r - v_m$ não é utilizado na malha de fluxo, cujo objetivo de controle é garantir uma referência de potência reativa $Q_{set} = 0$ VAR. Concomitantemente, um integrador com ganho k_i é inserido na malha de frequência para rastrear a referência de potência ativa $P_{set} = 0$ W. Além disso, durante este período de sincronização, como o conversor está desconectado da rede elétrica, é sintetizada uma corrente virtual i_v a partir de um filtro virtual, cuja entrada é a diferença de tensão sintetizada pelo conversor e a tensão da rede elétrica. Assim, garantindo que a potência reativa e o torque sejam regulados à zero, implica automaticamente na sincronização da tensão do conversor com a da rede, tanto em termos de amplitude quanto de ângulo.

Note que após a conexão com a rede elétrica, para a síntese de referências de potência, as malhas de frequência e fluxo devem permanecer inalteradas, com a diferença de que agora a corrente de saída i_{abc} é utilizada ao invés da corrente virtual. No modo ilhado, o synchronverter altera sua configuração, removendo o integrador da malha de frequência e incluindo o erro de tensão na malha de fluxo.

4 | RESULTADOS

Os parâmetros utilizados para simulação são apresentados na Tabela 1.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Potência nom. Conversor 1	10 kVA	Frequência nom.	60 Hz
Potência nom. Conversor 2	5 kVA	Tensão da rede	220 Vrms
Tensão barramento CC	700 V	τ_f	0.02 s
Ls	1 mH	τ_v	0.2 s
rs	0.1 Ω	Dp_1	7,0362
C	33.3 μ F	Dp_2	3,5181
Lg	0.1 mH	Dq_1	909,0909
rg	0.1 m Ω	Dq_2	454,5455

Tabela 1 –Parâmetros da simulação.

A simulação foi realizada no Typhoon HIL Control Center versão 2020.3. A simulação inicia em $t = 0$ s e a sincronização ocorre através do filtro virtual. Então, o disjuntor é fechado conectando o conversor 1 na rede elétrica principal em $t = 1$ s, é aplicado um degrau de potência ativa de 6 kW em $t = 2$ s, e aplicado um degrau de potência reativa de 2 kVar em $t = 3$ s. O disjuntor do conversor 2 é fechado conectando em paralelo na rede em $t = 4$ s, é aplicado um degrau de potência ativa de 3 kW em $t = 5$ s, e aplicado um degrau de potência reativa de 1 kVar em $t = 6$ s.

Em $t = 7$ s, ocorre a queda de frequência da rede de 60 para 59 Hz e a queda da tensão de 220 para 198 V (10%). Em $t = 8$ s, a rede elétrica é desconectada e os conversores passam a operar paralelamente e sem carga. Em $t = 9$ s, uma carga resistiva e indutiva com impedância $Z_{\text{carga}} = 14 + j4.5239 \Omega$ é inserida e uma parcela da potência é fornecida por cada conversor.

A Figura 4 apresenta as respostas do sistema conforme ocorrem os eventos apresentados. A traço em vermelho refere-se ao comportamento do conversor 1 e o traço azul ao comportamento do conversor 2.

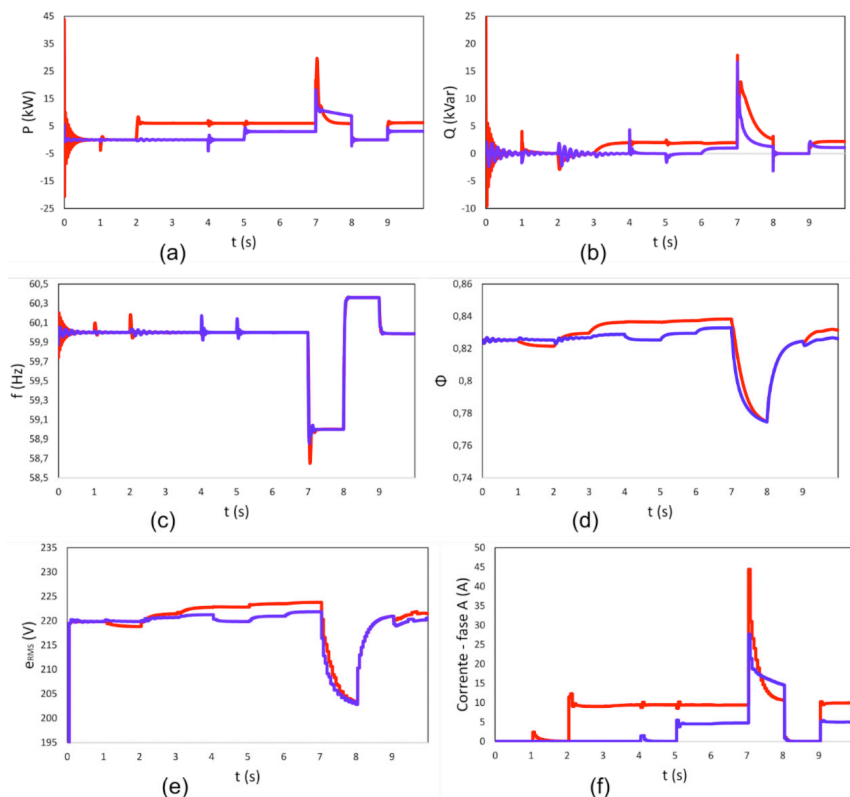


Figura 4 – Resultados de simulação. (a) Potência ativa P ; (b) Potência reativa Q ; (c) Frequência f ; (d) Fluxo Φ ; (e) Tensão sintetizada pelo conversor em RMS e (f) as correntes da fase A.

A sincronização ocorre de forma correta, observa-se na Figura 4(c) que os conversores sintetizam um valor igual a frequência nominal da rede de 60 Hz e em 4(e) amplitude da tensão próximo de $220 V_{rms}$, possibilitando o fechamento do disjuntor do conversor 1 em $t = 1$ s. Os valores de referência de potência ativa de 6 kW e potência reativa de 2 kVar enviados para o controlador através de um degrau foram alcançados pelo conversor 1, conforme observa-se na Figura 4(a) e 4(b). Um comportamento similar ocorre no conversor 2, não há problemas no momento do fechamento do disjuntor e conexão em $t = 4$ s. Os valores de referência de potência ativa de 3kW e potência reativa de 1kVar foram estabelecidos.

A mudança abrupta dos parâmetros da rede em $t = 7$ s gera um pico na corrente de fase do conversor, observado em 4(f), e a diminuição da frequência de operação do sistema. Em $t = 8$ s o disjuntor da rede é aberto e os conversores operam em paralelo e sem carga, observa-se em 4(a) e 4(b) que a potência fornecida é nula neste instante até que uma carga RL seja inserida em $t = 9$ s, assim cada conversor compartilha uma parcela da potência para alimentar a carga e os parâmetros de frequência nominal e tensão são reestabelecidos.

5 | BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental implementada é apresentada na Figura 5 e será descrita na sequência de acordo os aspectos funcionais e tecnológicos de cada uma das partes principais que a compõem. Com esta bancada é possível a simulação de uma MR com duas DERs passíveis de operarem conectadas na rede ou ilhadas, tal como simulado na seção anterior.

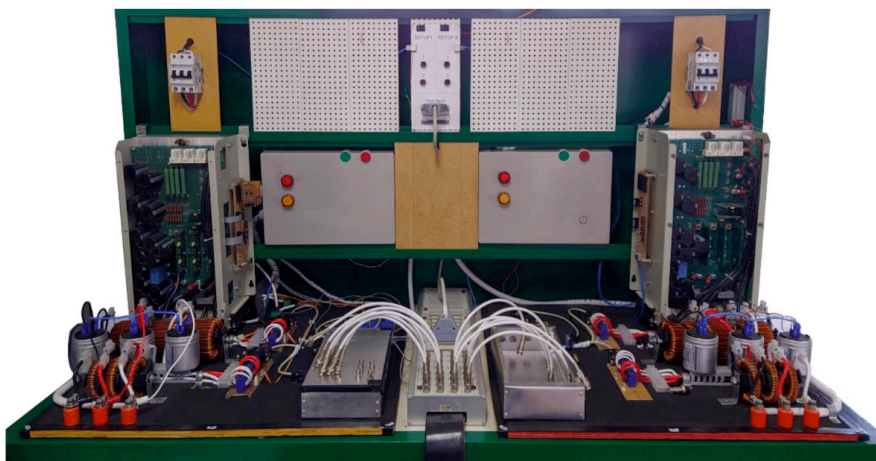


Figura 5-Bancada experimental desenvolvida em laboratório.

Fonte: Autor.

Uma vez que cada DER possui a mesma estrutura, apenas uma delas será descrita.

Sistema de controle digital: Na bancada experimental, a plataforma de controle digital permite a programação de controladores na placa controladora DS1103 da dSPACE diretamente através do MATLAB/Simulink®. A Figura 6 mostra a plataforma PC próxima à bancada experimental.



Figura 6—Computador próximo da bancada onde é feita a programação da MR.

Fonte: Autor.



Figura 7—Kit de controle digital da dSPACE.

Fonte: Autor.

A DS1103, mostrada na Figura 7, possui circuitos de interface eletrônica para aquisição de sinais analógicos, pinos entrada-saída, pinos para modulação PWM, comunicação serial, dentre outros.

Conversor PWM: O conversor permite que o barramento CC seja sintetizado através de uma fonte trifásica em corrente alternada (CA) por meio de um retificador não-controlado. Para prover mais flexibilidade e permitir a interface entre a placa controladora DS1103 e os circuitos de acionamento dos IGBTs, uma placa de circuito impresso foi

elaborada conforme mostrado na Figura 8, que recebe os sinais PWM gerados no sistema de controle e os envia para o acionamento de cada braço do conversor, ao mesmo tempo em que monitora sinais de erro oriundos dos circuitos de acionamento dos IGBTs para fins de proteção.

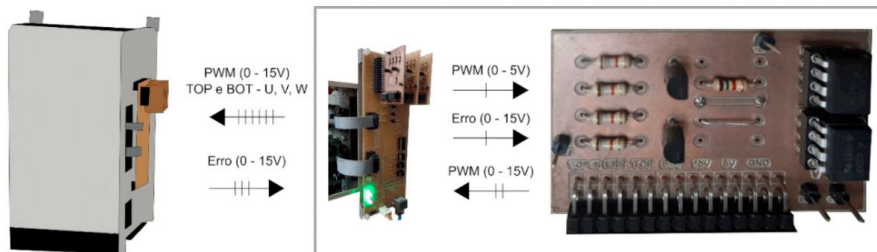


Figura 8—Placa de acionamento do conversor.

Fonte: Autor.

Filtro LCL e Disjuntor: Na saída do conversor é acoplado um filtro LCL como mostrado na Figura 9. Após este filtro existe um disjuntor que é implementado pelo circuito de manobra mostrado na Figura 10. Ele é composto por fusíveis modelo diazed, contadores, temporizadores, sinaleiras e botoeiras. O estado de condução dos contadores é determinado por meio de um relé acionado diretamente pela placa DS1103.



Figura 9—Filtro LCL.

Fonte: Autor.

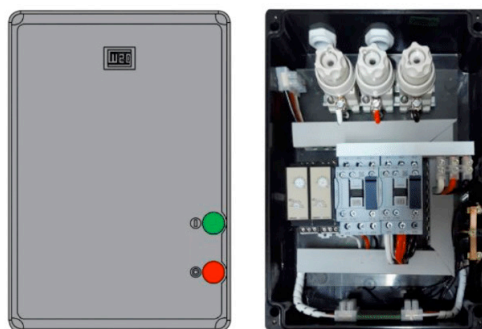


Figura 10—Circuito de manobra.

Fonte: Autor.

Sensores de tensão e corrente: Foram implementadas placas de circuito impresso para os sensores de efeito Hall usados para medição das tensões e correntes. As placas

são ilustradas na Figura 11. Os modelos utilizados são os da LEM, o LV 20-P para medição da tensão e o LA 55-P para corrente.

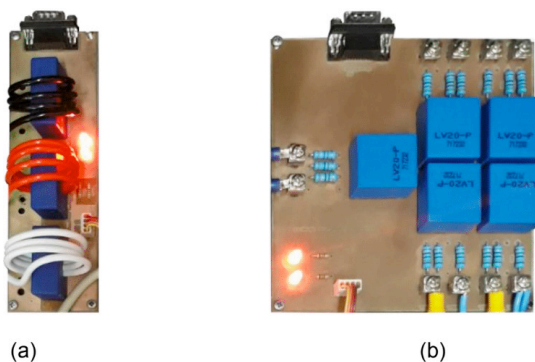


Figura 11–(a) placa com sensores LA 55-P, (b) placa com sensores LV 20-P.

Fonte: Autor.

Circuitos de condicionamento de sinais: Os sensores LV 20-P e LA 55-P sintetizam correntes que são transformadas em níveis de tensão, filtradas e condicionadas para níveis compatíveis com os conversores analógico-digital da DS1103. A Figura 12(a) mostra estas placas que estão acondicionadas em caixas metálicas de alumínio para diminuir o efeito de ruídos eletromagnéticos. Por fim, cada sinal já condicionado é enviado por meio de cabos blindados para a DS1103 como mostrado na Figura 12(b).

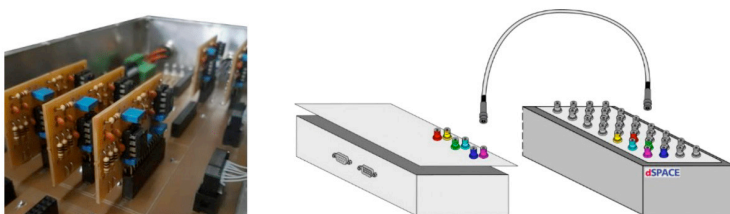


Figura 12 –(a) Placas de condicionamento de sinais e (b) circuito de manobra.

Fonte: Autor

6 | CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi descrito brevemente o *synchronverter* baseado no princípio da máquina síncrona virtual. Foram obtidos resultados de simulação numa microrrede em escala reduzida com duas DERs. A estratégia de sincronização com a rede, a síntese de

referências de potência e o compartilhamento de carga foram verificados via simulação. Por fim, foram descritos os principais aspectos tecnológicos acerca da implementação da bancada experimental simulada e que será utilizada para a validação de controladores para conversores em microrredes em aplicações futuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCT-GD e ao CNPQ processo 465640/2014-1 pelo apoio financeiro, e à Typhoon Inc. pela licença completa do Typhoon HIL Control Center. O professor Márcio Stefanello agradece a CAPES processo 423765/2016-7 pelo suporte financeiro para a realização da bancada experimental.

REFERÊNCIAS

BECK, H. P.; HESSE, R. **Virtual Synchronous Machine**. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization (EPQU), Barcelona. pp. 1-6, October 2007, doi: 10.1109/EPQU.2007.4424220.

GUERRERO, J. M.; CHANDORKAR, M.; LEE, T.; LOH, P. C. **Advanced control architectures for intelligent microgrids-Part I: Decentralized and hierarchical control**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 60, n. 4, pp. 1254-1262, April 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2194969.

IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. IEEE Std 2030.7-2017, pp.1-43, 23 April 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8295083.

IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. IEEE Std 2030.8-2018, pp.1-42, 24 August 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8444947

ZHONG, Q.; WEISS, G. **Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 58, n. 4, pp. 1259-1267, April 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO PADRÃO COM ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE TENSÃO NO MODO TENSÃO-POTÊNCIA ATIVA

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 05/01/2021

Vitor Francisco Bassi de Franchi Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Centro de Engenharia e Ciências Exatas
Curso de Engenharia Elétrica
Foz do Iguaçu – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1381030102516603>

Romeu Reginatto

Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Centro de Engenharia e Ciências Exatas
Foz do Iguaçu – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/9166033914580991>

RESUMO: A inserção de sistemas de armazenamento padrão (SAP) aparece como uma solução modular e integrada de geração solar e armazenamento de energia por baterias, com capacidade de atendimento de cargas locais e integração à rede elétrica. Na integração de geração solar à rede elétrica, especialmente na conexão em ramais de baixa tensão, podem ocorrer sobretensões indesejadas conforme as condições operativas. Este trabalho objetiva analisar sistemas de armazenamento padrão conectados à rede quando operando no modo tensão-potência ativa, o qual tem em vista mitigar o efeito de sobretensão decorrente da integração da geração solar. Os estudos foram feitos a partir do fluxo de potência continuado, utilizando os softwares Matlab e OpenDSS, considerando

a conexão em ramais de baixa tensão. Os benefícios do modo tensão-potência ativa são maiores quando o SAP é conectado distante do transformador de distribuição.

PALAVRAS - CHAVE: Geração solar, sobretensão, controle volt-watt.

ANALYSIS OF ENERGY STORAGE STANDARD SYSTEM WITH VOLTAGE CONTROL IN VOLTAGE-ACTIVE POWER MODE

ABSTRACT: The insertion of energy storage standard system (ESSS) appear as a modular solution and integrates of solar generation and energy storage by batteries, with service capacity of local loads and power grid integration. In integration of solar generation into the electricity grid, especially when connecting to low voltage branches, unwanted overvoltages may occur depending on operating conditions. This work aims to analyze energy storage standard system connected to the grid when operating in voltage-active power mode, which aims to mitigate the overvoltage effect resulting from the integration of solar generation. The studies were made from the continuation power flow, using the softwares Matlab and OpenDSS, considering the connection in low voltage branches. The benefits of voltage-active power mode are greatest when the ESSS is connected far from the distribution transformer.

KEYWORDS: Solar generation, overvoltage, volt-watt control.

1 | INTRODUÇÃO

A conexão de geradores diretamente ao sistema de distribuição de energia elétrica representa uma profunda mudança no sistema elétrico, em grande parte motivada pela necessidade de ampliar a penetração de energia renováveis. Sistemas de geração fotovoltaica são amplamente conectados em sistemas de distribuição pela facilidade que oferecem para instalações de pequeno porte e em níveis de baixa tensão.

Entretanto há impactos decorrentes da maior penetração de geração fotovoltaica, especialmente porque a inserção de geração distribuída (GD) em sistemas de distribuição causa diversos problemas operacionais e técnicos, que comprometem o despacho de energia bem como sua qualidade, elevando assim os custos envolvidos.

Uma das diversas variáveis de interesse para a qualidade de energia do sistema de distribuição e que podem ser impactadas pela instalação de GD é a tensão de regime permanente. Limites de variação de regime permanente estabelecidos em (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2018) categorizam a faixa adequada de tensão entre 0,93pu até 1,05pu. Neste sentido é importante a avaliação de possíveis condições em que a instalação de GD pode contribuir com a manutenção da tensão dentro destes limites, ou situações em que possa ser causa de sua violação. Uma forma de maximizar a exploração e consumo de energia gerada em um sistema fotovoltaico, é a implementação de SAP. Esses possuem estrutura similar a ilustrada na Figura 1, porém são fabricados de maneira integrada, incluindo armazenamento de energia, conexão à placas fotovoltaicas e funcionalidades para atendimento a cargas locais bem como fornecimento de energia ao sistema, podendo ser instalado de maneira modular. Há três elementos fundamentais: os painéis solares, as baterias e o inversor. Os painéis fotovoltaicos contêm as células fotovoltaicas que produzem energia elétrica (corrente contínua) individualmente quando sobre elas houver a incidência de irradiação solar. As baterias, por outro lado, permitem armazenar energia temporariamente. A energia armazenada pode ser a energia produzida pelos painéis solares e que não foi transferida para o sistema, sendo então acumulada para uso em outro momento.

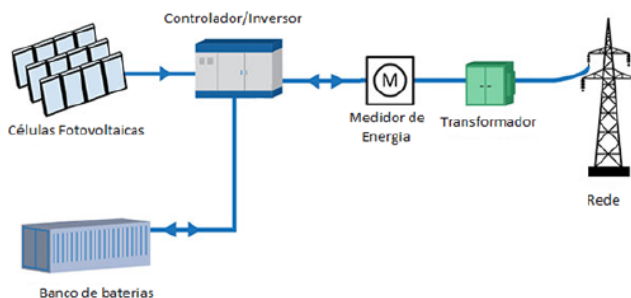


Figura 1: Sistema de geração solar com armazenamento de energia conectado à rede.
Adaptado de (COLAVITO; MICHAEL, 2015).

O inversor é o dispositivo de eletrônica de potência que converte a corrente contínua, gerada pelas células solares ou armazenada pelas baterias, em corrente alternada compatível com a rede elétrica em que é interligada. O inversor também garante a segurança de todo o sistema, uma vez que realiza o monitoramento das grandezas elétricas e é responsável pelo controle de fluxo de energia para a rede. O processo de carga e descarga das baterias bem como a manutenção dessas em nível adequado de carga é realizado pelo BMS (*Battery Management System*). A vida útil das baterias apresenta grande dependência da adequada atuação do BMS.

Tratando-se de regime permanente, um dos impactos mais observados devido a conexão de geradores fotovoltaicos em redes de baixa tensão é o aparecimento de sobretensões, especialmente em horários de grande geração e baixa demanda (CHAMANA; CHOWDHURY, 2014; IEEE, 2018; KATIRAEI et al., 2015; PILLAI; PUTRUS; PEARSALL, 2013; TANG et al., 2018). Surge então necessidade de medidas de controle de tensão para assegurar a qualidade da energia de modo a possibilitar que seja explorada ao máximo a capacidade de geração.

Neste contexto, controles locais em cada gerador distribuído podem contribuir com a melhoria da regulação de tensão no sistema de forma geral. Considerando o impacto da geração distribuída sobre a tensão de regime permanente, em especial o problema de sobretensão observado em consequência da penetração de geração fotovoltaica, um das alternativas para lidar com tais impactos tem sido a adoção de estratégias de controle de potência reativa nos próprios geradores distribuídos (IEEE, 2018; MAHMUD; ZAHEDI, 2016; POMPODAKIS et al., 2016).

A norma (IEEE, 2018) também estabelece um modo de controle tensão-potência ativa, no qual a potência gerada é limitada em valor que depende da tensão terminal, seguindo determinada curva tensão-potência ativa pré-determinada.

No modo tensão-potência ativa também conhecido como modo volt-watt (VW), por outro lado, a dosagem da potência ativa que é utilizada para fazer com que o sistema de geração fotovoltaica contribua com os níveis de tensão na rede.

A principal vantagem do modo tensão-potência ativa é sua simplicidade, em comparação aos modos de controle da potência reativa, pois não exige controles adicionais e tampouco maior capacidade do inversor, que seriam necessários para prover corrente reativa. Por esta razão, torna-se um modo que pode ser facilmente agregado à operação de sistemas de armazenamento padrão. Este é justamente o foco deste trabalho, analisar sistemas de armazenamento padrão utilizando o modo de operação tensão-potência ativa.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Fundamentos

A Figura 2 apresenta um diagrama simplificado de um alimentador de baixa tensão (BT) a qual representa um circuito equivalente em relação ao ponto de conexão do SAP.

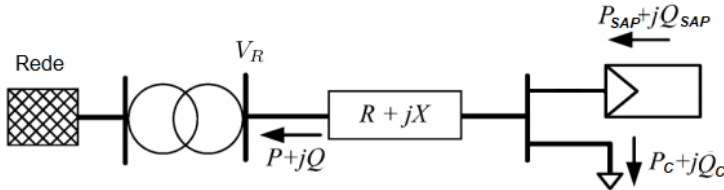


Figura 2: Diagrama unifilar simplificado do alimentador de BT com PV. Adaptado de (MARRA et al., 2014).

A queda de tensão ΔV sobre a impedância equivalente do alimentador $Z = R + jX$, causada pela corrente fornecida pelo SAP, pode ser calculada pela equação

$$\frac{\Delta V}{|V_R|} = \frac{Z \cdot I}{|V_R|} \quad (1)$$

A corrente I pode ser calculada através de

$$I = \left(\frac{S}{|V_R|} \right)^* = \left(\frac{P}{|V_R|} - j \frac{Q}{|V_R|} \right) \quad (2)$$

$$P = P_{SAP} - P_C \quad (3)$$

$$Q = Q_{SAP} - Q_C \quad (4)$$

onde, $P = P_{SAP} - P_C$ corresponde ao saldo líquido de potência ativa; e o termo $Q = Q_{SAP} - Q_C$ é referente ao saldo líquido de potência reativa.

A impedância equivalente do alimentador é expressa por uma parcela resistiva R e uma parcela reativa X . Substituindo I e Z podemos reescrever (1) como

$$\frac{\Delta V}{|V_R|} = \frac{(P \cdot R) + (Q \cdot X)}{|V_R|^2} + j \frac{(P \cdot X) + (Q \cdot R)}{|V_R|^2} \quad (5)$$

Na maioria dos sistemas de distribuição, é suficiente considerar apenas a componente real de (5) (STETZ; MARTEN; BRAUN, 2013), resultando em:

$$\frac{\Delta V}{|V_R|} = \frac{(P \cdot R) + (Q \cdot X)}{|V_R|^2} \quad (6)$$

A equação (6) representa a variação do módulo da tensão em função da potência ativa e da potência reativa. A potência ativa tem impacto na tensão em sistemas de distribuição, pois redes de baixa tensão tipicamente possuem baixa relação X/R , ou possuem valores não desprezíveis de resistência. Desta forma, a influência exercida pela potência ativa no enrolamento do nível de tensão é maior que quando comparada a influência da potência reativa. Isso justifica a necessidade da utilização de um modo de controle. A seguir é apresentado o modo de controle baseado na curva VW.

Parâmetros do modo VW	Configuração padrão	Faixa de configurações permitidas	
		Mínima	Máxima
V_1	1,02 pu	1,00 pu	1,04 pu
P_1	$P_{nominal}$	-	-
V_2	1,05 pu	+ 0,01 pu	1,05 pu
P_2	0	0	$P_{nominal}'$

Tabela 1: Configurações e parâmetros do modo VW

2.2 Curva VW

O projeto da curva tensão-potência ativa foi baseado na norma recentemente publicada por (IEEE, 2018). A norma estabelece uma curva linear por partes entre tensão e potência ativa, dentro dos limites operativos do sistema de geração. A Figura 3 ilustra a curva característica tensão-potência ativa apresentada na norma.

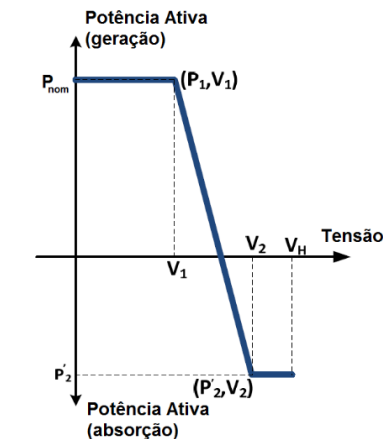


Figura 3: Curva característica para o modo tensão-potência ativa do inversor. Adaptada de (IEEE, 2018).

A Tabela 1 foi baseada em (IEEE, 2018) e apresenta a faixa de valores que podem ser atribuídos aos parâmetros para a configuração do controle modo VW. Os valores apresentados foram utilizados para atender o PRODIST. O modo de controle atua dentro de um determinado limite de tensão, estabelecido por V_1 e V_2 . $P_{nominal}$ corresponde à potência nominal de geração do SAP, $P_{nominal}'$ é referente à potência nominal que pode ser armazenada (absorvida) pelo SAP.

2.3 Matlab e OpenDSS

O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) é um software de simulação para sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica. Esse simulador é baseado em séries temporais *quasi-estacionárias*, o que permite a realização de simulações sequenciais no tempo. Assim, é possível analisar como os sistemas se comportam durante um determinado valor de tempo definido.

Decorrente do fato de que o software OpenDSS não implementa o modo de controle VW naturalmente, não é possível obter soluções de fluxo de potência diretamente com o OpenDSS para este modo de controle. Para obter a solução do fluxo de potência para o modo VW, foi então utilizado um algoritmo iterativo utilizando OpenDSS e Matlab, isso é possível pois o OpenDSS oferece uma interface COM (*Common Object Model*) o que permite ser executado pelo Matlab e utilizar recursos fornecidos por esse.

O procedimento é realizado da seguinte forma, dados referentes ao SAP são parâmetros de entrada do Matlab, entre eles é estipulada uma potência gerada, P_{ger} . Os dados fornecidos são então implementados no OpenDSS e assim é resolvido o fluxo de potência. Tendo o procedimento convergido, a tensão nos terminais do SAP, V_{term} , é utilizada para o cálculo de P_{max} , que é a máxima potência prevista pela curva característica tensão-potência ativa. Tendo o valor de P_{max} é verificado se $P_{max} > P_{ger}$ é satisfeita, se sim a condição de operação do SAP está dentro da curva e assim o modo de controle não deve atuar, caso o contrário, é necessário alterar o valor de P_{ger} a fim de que essa esteja sobre a curva definida. Esse procedimento é realizado através de um algoritmo que utiliza o método da bisseção, o qual é realizado enquanto a condição $|P_{max} - P_{ger}| < \mathcal{E}$ não for satisfeita, onde \mathcal{E} é uma tolerância imposta pelo usuário. O fluxograma visto na Figura 4 apresenta os procedimentos empregados, é visto que para cada iteração do método, o fluxo de potência é recalculado e uma nova P_{max} é obtida. Para o valor convergido de P_{ger} , as medições de interesse calculadas pelo OpenDSS podem ser usadas pelo usuário no Matlab para as análises gráficas referente ao impacto devido a conexão do SAP.

2.4 Sistema teste

As análises acerca do impacto da inserção do SAP à rede de distribuição foram realizadas considerando um sistema teste composto por um alimentador de distribuição de 32 nós e 3 ramais de baixa tensão de topologias distintas. Entretanto, os resultados

são apresentados apenas para um destes ramais, por restrições de espaço. A seguir é apresentada uma breve descrição sobre o sistema teste.

2.4.1 Alimentador de distribuição de 32 nós

A estrutura do alimentador de distribuição de 32 nós está ilustrada na Figura 5. Consiste em um alimentador localizado no interior do estado de São Paulo, com 32 nós, nível de tensão de 13,8kV, 60Hz. Os dados deste alimentador foram obtidos de (SALIM, 2011).

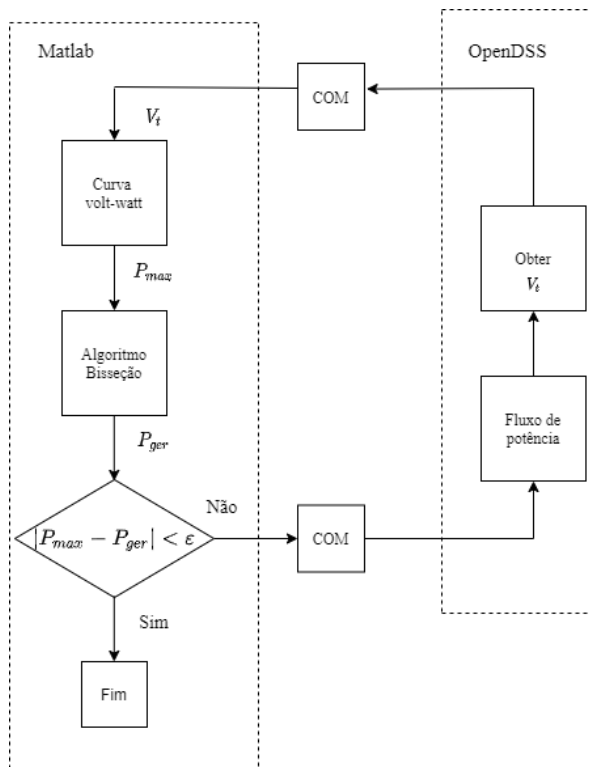


Figura 4: Fluxo de informações e ações entre o OpenDSS e Matlab

A barra identificada como 291 representa a barra de conexão ao sistema de subtransmissão, em 138kV, 60Hz. O transformador de conexão é de três enrolamentos, com tensões de 138/11,5/13,8kV e conexão $Y/\Delta/Y_g$. A conexão ao sistema de subtransmissão é considerada forte, representada por uma potência de curto-circuito de 2.000MVA, com relação de X/R de 10^5 .

O alimentador possui 3 bancos de capacitores conectados aos nós 292, 905 e 804, respectivamente. São representados 22 pontos de carga, compondo uma carga total

nominal de 10,482kW e 2,513MVar. Ainda, o nó 603 possui um nível de tensão diferenciado, de 2,4kV.

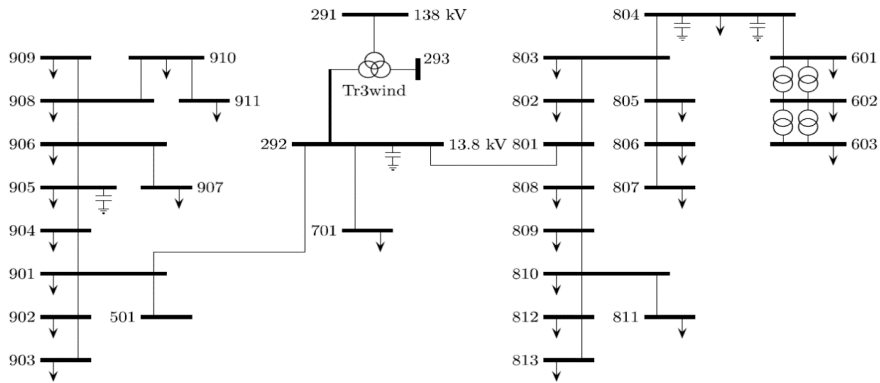


Figura 5: Alimentador de distribuição de 32 nós São Paulo.

Fonte: (SALIM, 2011).

2.4.2 Ramal

A topologia deste ramal foi inspirada em um ramal rural real da cidade de Guaropé-RS. Foi utilizada uma representação trifásica equilibrada, sendo adotados parâmetros típicos para as linhas extraídos de (DICKERT; DOMAGK; SCHEGNER, 2013). Valores das cargas são fictícios, porém na ordem de grandeza do caso real considerado, sendo a carga total instalada de 25,3kW e 6,7kVar. A topologia do ramal é apresentada através da Figura 6, com 6 nós compondo o tronco principal do ramal e 5 nós representando a conexão de residências. A carga correspondente a uma das residências é representada diretamente sobre o nó 958

O ramal foi conectado ao nó 902 do alimentador de 32 nós através de um transformador de distribuição trifásico 13,8kV para 380V, com potência nominal de 100kVA e reatância de dispersão de 4%. A potência nominal do SAP foi estabelecida como sendo 30kW e tendo uma capacidade de consumo de 6kW.

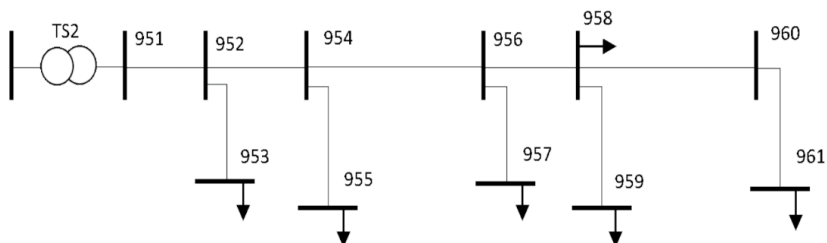


Figura 6: Topologia ramal GP (Guaropé)

Para as análises foram adotados três pontos de conexão ao longo do ramal, visando abranger o início, meio e fim. Para cada ponto de conexão, a potência fornecida pelo SAP foi sendo incrementada, até sua limitação ser necessária. Inicialmente foi assumido que o SAP estava consumindo potência.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões acerca das simulações realizadas.

3.1 OpenDSS e Matlab

Como citado anteriormente, o algoritmo responsável pelo controle tensão-potência ativa foi implementado em Matlab e devido a necessidade da utilização de um método numérico para a convergência do resultado, utilizou-se o método da bisseção. A Figura 7 apresenta o valor de potência gerada pelo SAP para uma conexão ao nó 961 e uma condição de carga leve. Podemos verificar que foram necessárias 17 iterações para a convergência e o valor obtido foi de 0,21pu o que corresponde a aproximadamente 6,4kW.

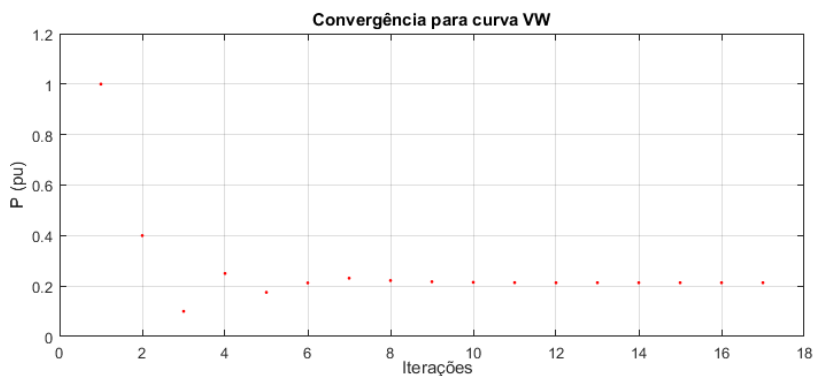


Figura 7: Convergência para a curva VW

3.2 Análise do comportamento operativo do sistema devido a inserção do SAP

As análises apresentadas nessa seção foram realizadas com o intuito de verificar o impacto sobre o perfil de tensão devido a inserção do SAP em diversos nós de conexão do ramal. Condições de carga também foram alteradas para essa verificação. É realizada o fluxo de potência continuado, que consiste na obtenção do fluxo de potência do sistema para cada potência fornecida pelo SAP. Adotou-se que a faixa de variação de potência fornecida vai de -20% (absorção) até 100% (geração) da potência nominal (30kW).

A Figura 8 apresenta o nível de tensão, nos terminais do SAP, quando esse se encontra conectado em cada nó apresentado. A escolha desses nós foi feita a fim de realizar um mapeamento das condições operativas no ramal, em seu início (nó 951), meio (nó 956) e fim (nó 961). Através da Figura 8 é visto como a tensão é elevada à medida que a distância do nó de conexão do SAP se distancia em relação ao transformador de distribuição. Pode-se verificar a influência da distância na sobretensão através da equação (6), uma vez que a resistência equivalente é um fator proporcional a distância ao nó de conexão do SAP ao transformador de distribuição. Quanto mais distante do transformador de distribuição maior será essa resistência e assim maior sua influência. Com o modo de controle VW ativo (caso 1) cujos os parâmetros são: $V_1 = 1,01pu$, $P_1 = 1,00pu$, $V_2 = 1,04pu$ e $P_2 = -0,2pu$ é visto que a tensão é limitada evitando assim ultrapassar o limite superior definido, contudo o limite inferior é violado quando o SAP está consumindo potência ativa e para uma geração menor que 5kW, quando conectados distantes do transformador de distribuição.

A Figura 9 apresenta os níveis de tensão nos terminais do SAP para cada nó de conexão e para cada nó é apresentada diferentes condições de carga. Carga 0,1 é referente à 10% da carga nominal do sistema, sendo assim é classificada como uma condição de carga leve. Carga 1 corresponde à carga nominal do sistema (25,3kW; 6,7kVAr) representado uma condição de carga pesada. Pode-se verificar que para condições de carga leve os níveis de tensão são mais afetados. Isso ocorre, pois com uma condição de carga leve a corrente que percorre a rede é reduzida e consequentemente a queda de tensão ao longo dessa. A tensão no nó 961 antes da conexão do SAP era de 0,898pu para uma condição de carga pesada e de 0,992pu para uma condição de carga leve. Tendo esses valores pode-se concluir que para uma mesma variação do nível de tensão, a tensão para a condição de carga leve terá uma magnitude maior quando comparada com a condição de carga pesada. Tendo em vista que a conexão em um nó mais distante do alimentador (nó 961) e uma condição de carga leve apresentam os resultados mais significativos, as seguintes análises foram feitas considerando essas condições. Foi verificado também como ocorreu a limitação de tensão-potência ativa pela curva VW para os três nós de conexão.

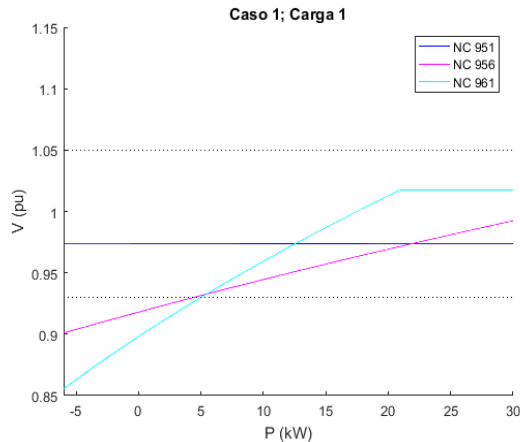


Figura 8: Tensão nos terminais do SAP para diferentes nós de conexão

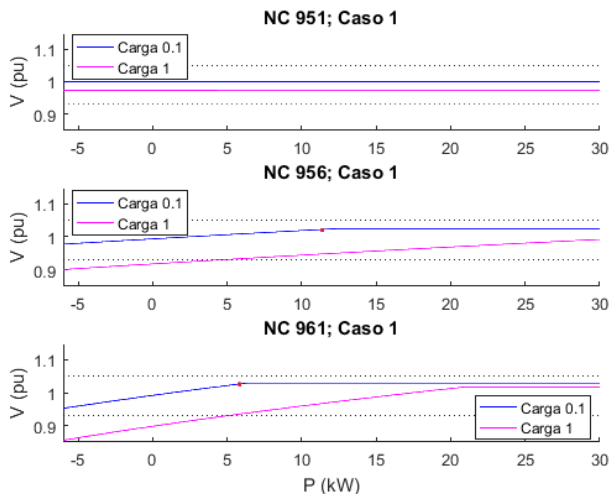


Figura 9: Perfil de tensão em diferentes nós para as condições de carga

3.3 Comportamento do SAP frente a variações de carga

Visando verificar o comportamento/operação do SAP para uma situação na qual a geração e a carga estão continuamente variando, adotou-se perfis de geração e consumo ao longo de um dia, os dados foram obtidos de (KASHANI; MOBARREZ; BHATTACHARYA, 2019). A Figura 10 apresenta os perfis de geração e de carga utilizados.

Para representar a utilização de baterias no sistema, foi considerada a possibilidade de geração constante do SAP em 18kW (60% da potência nominal). A Figura 11 apresenta o perfil de tensão no nó de conexão do SAP para a situação na qual o modo de controle VW está ativo e para uma situação na qual há ausência dele, e pode-se observar de fato

que com sua presença a sobretensão é evitada (curva em azul). A Figura 12 apresenta o perfil de geração para as situações adotadas anteriormente, e através do gráfico é visto que ocorre limitação de potência na maior parte do período analisado, entretanto no intervalo de 17 às 21 horas a potência ativa fornecida é igual a máxima disponível. Isso ocorre, pois nesse intervalo a potência demandada apresenta um valor superior, em relação aos outros instantes de tempo, levando a uma queda de tensão maior ao longo da rede de distribuição e, nessa circunstância é necessária a injeção de potência ativa na rede a fim de elevar o nível de tensão no ponto de conexão do SAP.

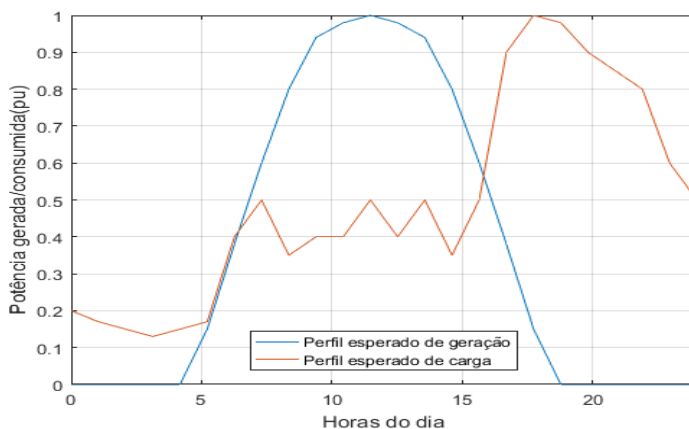


Figura 10: Perfis de geração e de carga utilizados

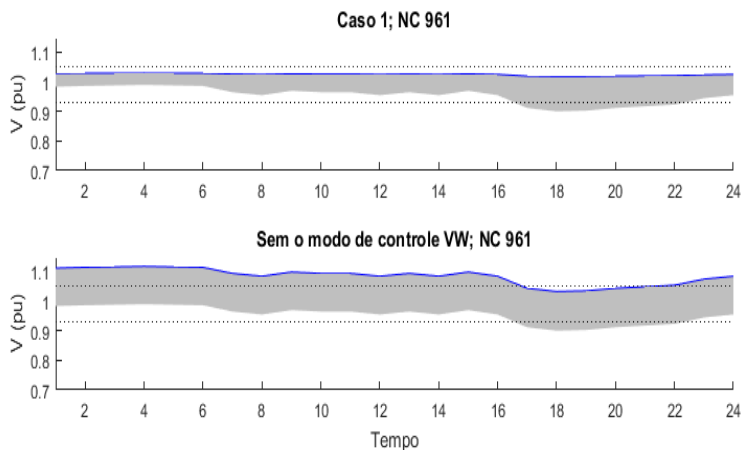


Figura 11: Influência do modo de controle VW no perfil de tensão diário

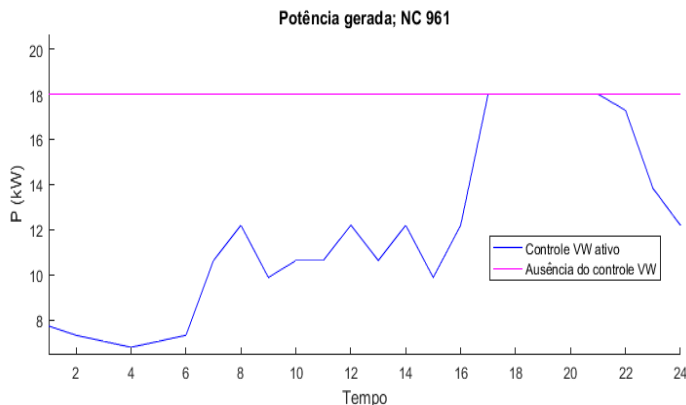


Figura 12: Perfis de geração com controle VW ativo e desativado

4 | CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo analisar o impacto ocasionado devido à inserção de SAP em redes de distribuição de média tensão empregando o método de controle VW. Foram apresentados os principais fatores que influenciam na elevação do perfil de tensão: distâncias do nó de conexão do SAP ao nó do alimentador e as condições de carga, juntos esses fatores correspondem à situação mais crítica para a inserção de um SAP. O método de controle utilizado apresenta uma grande vantagem devido a sua simplicidade uma vez que não exige controles adicionais e tampouco maior capacidade do inversor.

Através dos resultados obtidos foi possível observar que o modo de controle VW atenua o efeito da sobretensão decorrente da integração da geração solar, tornando assim a tensão nos terminais do SAP abaixo de uma tensão limite estabelecida e consequentemente mantendo a qualidade da energia no ponto de conexão.

Utilizando perfis diários de geração e carga, pode-se verificar que para uma situação na qual não há controle VW foi verificada sobretensão nos terminais do SAP durante um período de oito horas. Isso ocorreu, pois nesse intervalo de tempo a carga apresentava um valor reduzido e a disponibilidade de geração era alta, o que foi propício para ocasionar a sobretensão. Considerando uma geração fixa foi verificado que nenhum dos limites são violados e para alguns momentos do dia a potência ativa fornecida é máxima. Esse comportamento justifica a utilização do modo de controle VW juntamente com o SAP.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** [s.l.: s.n.].

CHAMANA, M.; CHOWDHURY, B. H. Impact of smart inverter control with PV systems on voltage regulators in active distribution networks. **2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (Photonics for Energy), HONET-PfE 2014**, p. 115–119, 2014.

COLAVITO, C. J.; MICHAEL, J. Deploying Solar-Plus-Storage Microgrids. **Sol. Pro** 8, v. 4, 2015.

DICKERT, J.; DOMAGK, M.; SCHEGNER, P. Benchmark low voltage distribution networks based on cluster analysis of actual grid properties. **2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech, POWERTECH 2013**, 2013.

IEEE. **IEEE Std. 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. New York: [s.n.].

KASHANI, M. G.; MOBARREZ, M.; BHATTACHARYA, S. Smart Inverter Volt-Watt Control Design in High PV-Penetrated Distribution Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 2, p. 1147–1156, 2019.

KATIRAEI, F. et al. Field verification and data analysis of high PV penetration impacts on distribution systems. **2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015**, n. April 2013, 2015.

MAHMUD, N.; ZAHEDI, A. Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 582–595, 2016.

MARRA, F. et al. A decentralized storage strategy for residential feeders with photovoltaics. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 5, n. 2, p. 974–981, 2014.

PILLAI, G. G.; PUTRUS, G. A.; PEARSALL, N. M. Impact of distribution network voltage rise on PV system energy yield. **2013 Annual IEEE India Conference, INDICON 2013**, p. 0–4, 2013.

POMPODAKIS, E. E. et al. Photovoltaic systems in low-voltage networks and overvoltage correction with reactive power control. **IET Renewable Power Generation**, v. 10, n. 3, p. 410–417, 2016.

SALIM, R. H. Uma Nova Abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos. p. 202, 2011.

STETZ, T.; MARTEN, F.; BRAUN, M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 2, p. 534–542, 2013.

TANG, Y. et al. Stability Impact of PV Inverter Generation on Medium Voltage Distribution Systems. **2018 International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018**, p. 3705–3710, 2018.

CAPÍTULO 9

DESENVOLVIMENTO DE UM FOTOMETRO MICROCONTROLADO PARA ANÁLISE DE SUBSTÂNCIAS

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 04/01/2021

Domingos Perego Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8773388323064714>

Alberto Noboru Miyadaira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6520306641343676>

Oldair Donizeti Leite

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8436215509083608>

Gabriela Dias Alba

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8628678348027322>

Eduardo Cezar Lenz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/3480202879421372>

João Pedro de Araújo Nespolo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1269642729910260>

RESUMO: Esse trabalho propõe a construção de um fotômetro de baixo custo para análise de substâncias. Tomando como princípio a Lei de

Lambert-Beer, o equipamento foi desenvolvido utilizando um microcontrolador ARM e um LED RGB como fonte de radiação. Como elemento sensor de luz, três modelos diferentes de sensores foram testados: Um sensor LDR, o sensor analógico TEMT600 e o sensor digital BH1750. O dispositivo foi testado por meio da medição da absorvância de diferentes soluções de corantes alimentícios. O desempenho de cada sensor foi avaliado por meio da análise da linearidade das medições e de sua semelhança com as medidas obtidas pelo espectrofotômetro PerkinElmer LAMBDA XLS. Todos os sensores apresentaram linearidade satisfatória e uma boa similaridade com o espectrofotômetro. No entanto, o sensor BH1750 foi o que obteve os melhores resultados.

PALAVRAS - CHAVE: Fotometria; Microcontroladores; Instrumentos de Medição.

DEVELOPMENT OF A MICROCONTROLLED PHOTOMETER FOR SUBSTANCE ANALYSIS

ABSTRACT: This work proposes the development of a low-cost photometer for substance analysis. Taking the Lambert-Beer law as a principle, the equipment was assembled using an ARM microcontroller and an RGB LED as the radiation source. For the light sensor element, three different sensors were tested: An LDR, the analog sensor TEMT6000, and the digital sensor BH1750. The equipment was tested by measuring the absorbance of different solutions of food coloring. The performance of each sensor was evaluated through the analysis of the

measure's linearity, and the similarity to the values obtained by the PerkinElmer LAMBDA XLS spectrophotometer. All of the sensors presented satisfactory linearity and a good similarity to the spectrophotometer. However, the BH1750 sensor obtained the best results.

KEYWORDS: Photometry; Microcontrollers; Measuring Instruments.

1 | INTRODUÇÃO

A área de análises químicas instrumentais possui como uma de suas atividades mais comuns a determinação da concentração de um soluto em um solvente. A fotometria é amplamente utilizada para a medição da concentração de substâncias. Trata-se de uma técnica onde a intensidade da radiação é medida utilizando transdutores fotoelétricos e outros tipos de dispositivos eletrônicos. Essa técnica é empregada em geral por meio da utilização de um dispositivo denominado fotômetro.

Segundo Pontes (2014, p.8), o princípio de funcionamento dos fotômetros se dá por meio da Lei de Lambert-Beer, que relaciona a absorbância de um soluto à sua concentração. A absorbância nada mais é do que a quantidade de luz que uma determinada amostra absorve. A Lei de Lambert-Beer pode ser expressa por meio da equação (1):

$$A = \log_{10}(I/I_0) = e \cdot b \cdot C \quad (1)$$

Onde **A** representa a absorbância, **I** representa a luz transmitida, **I₀** representa a luz incidente, **C** representa a concentração, **b** representa a distância que a luz atravessa no corpo e **e** é a constante de absortividade molar da substância. Dessa forma, medindo a intensidade da luz incidente e transmitida, é possível medir a concentração de um soluto conhecido em uma solução.

Segundo Squissatto (2018, p.27), a medição da absorbância pode ser realizada da seguinte maneira: Primeiramente, um feixe de luz é incidido apenas no solvente e a luz é medida do outro lado. Assume-se que o solvente possui absorbância praticamente nula. Dessa forma, tem-se basicamente o valor da luz incidente (**I₀**). Essa amostra que contém apenas o solvente recebe o nome de amostra branca, ou amostra de referência. Depois disso, o feixe de luz é incidido novamente, mas dessa vez na solução cuja concentração do soluto se quer medir. Assim, tem-se a quantidade de luz transmitida (**I**).

Segundo Moreira *et al.* (2016, p.146), para a montagem de um fotômetro, são necessários os seguintes elementos: Uma fonte de radiação, que geralmente é uma lâmpada de tungstênio; um mecanismo para selecionar determinado comprimento de onda; uma cubeta; um elemento sensor de luz; um circuito de condicionamento do sinal; sistema de aquisição e processamento de dados com uma interface para o usuário.

No presente trabalho, foram avaliadas algumas características de um protótipo de fotômetro empregando um microcontrolador ARM, LED RGB para emissão de radiação e diferentes tipos de sensores detectores (LDR, TEMENT6000, BH1750).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Na montagem do fotômetro, optou-se por utilizar um LED RGB como fonte de luz. O gerenciamento do acionamento do LED se dá pelo envio de sinal PWM de um microcontrolador. Segundo Araújo *et al.* (1997, p.137), o LED RGB apresenta resultado satisfatório para a maiorias das aplicações em fotometria.

Três modelos de sensores de luminosidade foram testados: Um fotoresistor (LDR), que geralmente é o mais utilizado para esse tipo de aplicação; um sensor analógico modelo TEMENT6000; e um sensor digital modelo BH1750.

As medidas de absorbância foram realizadas em um suporte em PLA impresso em 3D. No suporte, foram fixados o elemento sensor e emissor, além de permitir intercambiar a cubeta de vidro (1,3 x 1,3 cm) utilizada para o acondicionamento das soluções de concentração conhecidas. Como se tratam de três sensores diferentes, três suportes diferentes foram confeccionados. Os suportes dos sensores BH1750 e do LDR podem vistos na Figura 1:

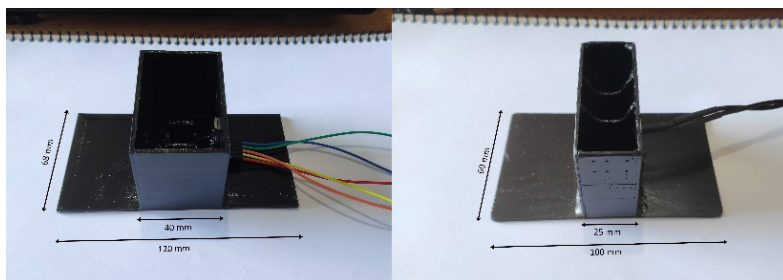


Figura 1 – Suportes dos sensores BH1750 e LDR

Fonte: Autoria própria.

Para realizar todo o controle do sistema, utiliza-se um microcontrolador LPC1769 de arquitetura ARM, desenvolvido pela NXP, cujo algoritmo foi implementado em linguagem C. Esse microcontrolador é responsável por gerar o sinal PWM para o LED, bem como receber e interpretar o sinal medido pelo sensor. Além disso, ele realiza a comunicação com o supervisório que roda em um computador.

O ambiente de programação utilizado foi o MCUXpresso IDE, também da NXP. Para o supervisório, utilizou-se o LabView da National Instruments.

A utilização do equipamento se dá da seguinte maneira: O usuário seleciona a cor desejada na fonte de luz por meio do supervisório. O supervisório se comunica com o microcontrolador, que envia o sinal PWM para o LED, fazendo-o assumir a cor desejada. Depois disso, o usuário deve colocar a cubeta contendo apenas o soluto no suporte, e

tapa-lo para evitar a interferência na medida. Feito isso, é necessário apertar o botão para que a leitura seja efetuada. O valor lido pelo sensor é mandado para o microcontrolador e mostrado na tela do supervisor. O usuário deve esperar o valor se estabilizar e anotar o valor medido, que representa a intensidade de luz incidida. Posteriormente, deve retirar da cubeta o solvente e colocar a solução cuja concentração se quer medir. Deve repetir o processo anterior para realizar a medida da luz transmitida. Por fim, conhecendo os dois valores é possível calcular a absorvância da amostra por meio da Lei de Beer-Lambert. Futuramente planeja-se automatizar o cálculo da concentração, sendo que todo o cálculo será realizado diretamente pelo supervisor e retornará o valor da absorvância ao usuário. O esquema de funcionamento do dispositivo pode ser visto na Figura 2.

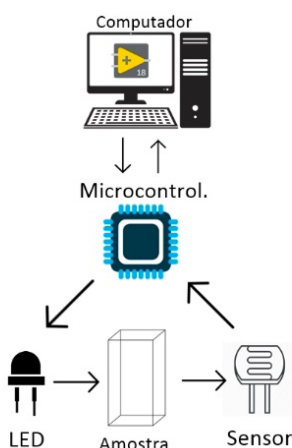


Figura 2 – Esquema de funcionamento do dispositivo.

Fonte: Autoria própria.

Feita toda a montagem do circuito e do equipamento, bem como a programação do microcontrolador, foi possível realizar estudos preliminares do dispositivo proposto, com os três tipos de elementos sensores. Nesses estudos, uma série de soluções com concentrações conhecidas foram utilizadas. Comparativamente, para avaliar o desempenho das medidas do fotômetro proposto, foi utilizado um espectrofotômetro comercial da marca PerkinElmer, modelo LAMBDA XLS.

Para realizar as medidas de absorvância com o dispositivo proposto, soluções de corantes alimentícios (amarelo, vermelho, verde e azul) nas concentrações entre 0,1 a 0,6 mg/L foram utilizadas. Para cada corante, as medidas foram realizadas com o LED RGB empregando os feixes de luz vermelho, verde e azul respectivamente. Os valores de absorvância foram estimados empregando a equação (1), e os valores das medidas

obtidas, para cada concentração das soluções corantes utilizadas, e as medidas do soluto sem corantes (branco).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após análises preliminares, verificou-se que as maiores magnitudes de sinais de absorbância para os corantes foram observadas utilizando as seguintes cores de LED: Corante amarelo empregando o LED azul, corante vermelho empregando o LED azul e/ou verde, corante verde empregando o LED azul e/ou vermelho e, corante azul empregando o LED vermelho. Esses resultados podem ser explicados pelo fenômeno de absorção da espécie pela sua cor complementar, ou seja, a espécie analisada absorve mais significativamente comprimentos de onda da sua cor complementar. Assim, para cada corante apresenta-se uma discussão avaliando a performance dos respectivos sensores obtidos nos comprimentos de onda de maior absorção.

Para cada concentração, foi realizada uma regressão linear, obtendo o coeficiente de correlação linear (R^2) indicado no gráfico.

O gráfico da absorbância medida por cada sensor pode ser visto nas Figuras entre 3 e 6.

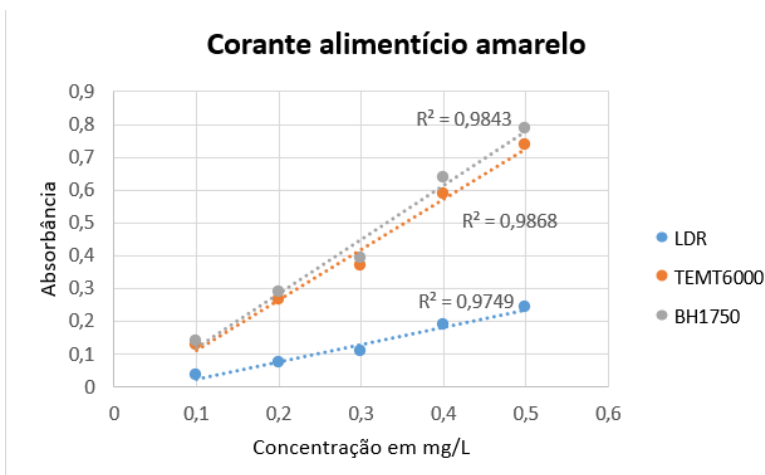


Figura 3 – Absorbância para o corante amarelo usando LED azul.

Fonte: Autoria própria.

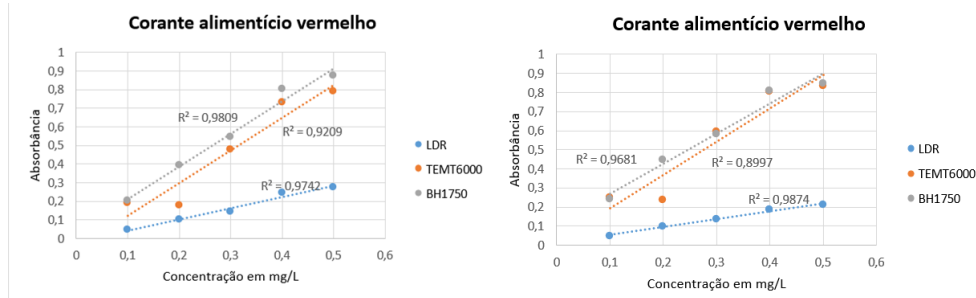


Figura 4 - Absorbância para o corante vermelho usando LED verde e azul, respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

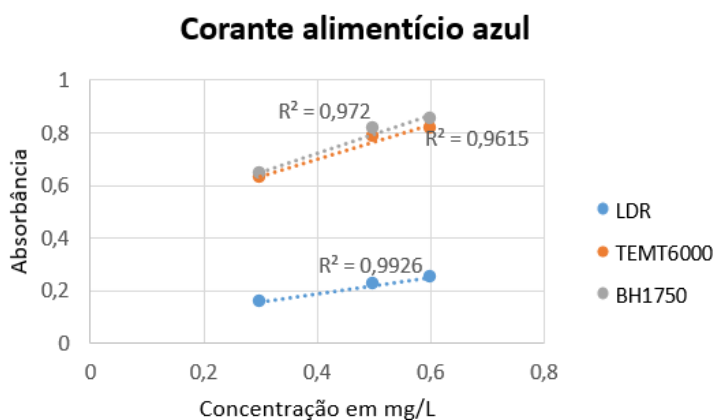


Figura 5 - Absorbância para o corante azul usando LED vermelho.

Fonte: Autoria própria.

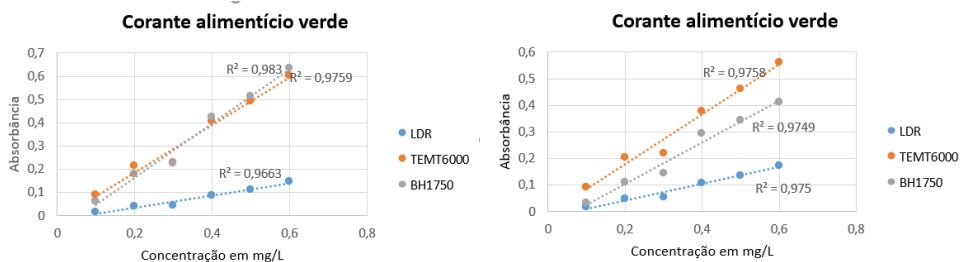


Figura 6 - Absorbância para o corante verde usando LED vermelho e azul, respectivamente

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar as curvas obtidas, pode-se perceber que todos sensores apresentaram linearidade satisfatória dentro do intervalo analisado. Também se nota que os sensores que

apresentaram maior absorbância foram os sensores TEMT6000 e o BH1750.

Medidas empregando um espectrofotômetro comercial também foram realizadas com as soluções utilizadas no protótipo (espectrofotômetro Perkin Elmer LAMBDA XLS). O perfil dos resultados obtidos é apresentado na Figura 7.

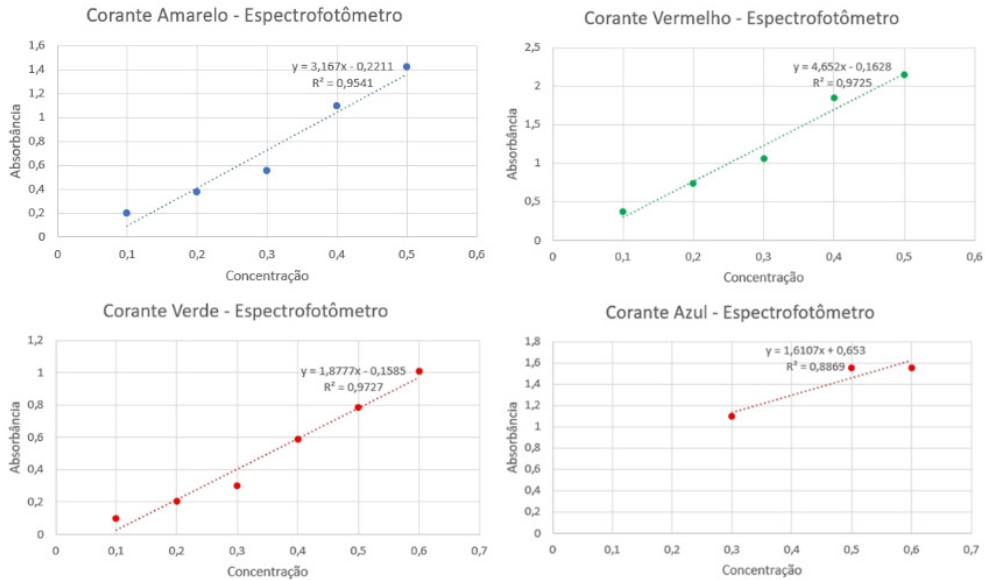


Figura 7 – Medições com o espectrofotômetro

Fonte: Autoria própria.

Como esperado, a magnitude dos sinais de absorbância foi superior aqueles observados empregando o fotômetro proposto, porém nenhum tipo de implementação de amplificação de sinal foi realizado. Entretanto para a faixa de concentração avaliada das soluções nenhum prejuízo foi observado quando realizado pelo dispositivo proposto. Uma análise da proporcionalidade entre os sinais obtidos com os sensores do protótipo e o equipamento comercial (espectrofotométrico) foi realizado e os resultados são apresentados nos Quadros de 1 a 4.

Seção	LDR	TEMT6000	BH1750
Média	5,513	1,650	1,536
Desvio Padrão	0,353	0,232	0,215

Quadro 1 – Análises das amostras de corante amarelo.

Fonte: Autoria própria.

Seção	LDR	TEMT6000	BH1750
Média	8,639	2,266	1,970
Desvio Padrão	1,296	0,653	0,422

Quadro 2 – Análises das amostras de corante vermelho.

Fonte: Autoria própria.

Seção	LDR	TEMT6000	BH1750
Média	6,738	1,880	1,815
Desvio Padrão	0,422	0,110	0,098

Quadro 3 – Análises das amostras de corante azul.

Fonte: Autoria própria.

Seção	LDR	TEMT6000	BH1750
Média	6,636	1,291	1,419
Desvio Padrão	0,722	0,247	0,194

Quadro 4 – Análises das amostras de corante verde.

Fonte: Autoria própria.

Analisando magnitude das médias, observa-se que os sinais obtidos com o LDR foram em torno de 6,0 vezes menores aquele obtidos com o espectrofotômetro. Já, as magnitudes obtidas com o TEMT6000 e BH1750 estão no intervalo de 1,5 a 2,0 vezes menores.

4 | CONCLUSÃO

Na avaliação dos sensores detectores empregados no protótipo proposto, todos os sensores apresentaram resposta linear dentro do intervalo de concentração avaliado. Porém os sensores BH1750 e TEMT6000 apresentaram magnitudes de sinais na ordem de 2,0 menores que aquelas observadas para o espectrofotômetro. Já o sensor LDR apresentou proporcionalmente sinais 6,0 vezes menores ao obtido no espectrofotômetro. Além disso, observou-se que, por ser um sensor digital, o sensor BH1750 apresenta sinal de resposta mais estável do que os outros dois sensores, permitindo uma medição mais robusta. Neste estudo, o sensor digital BH1750 se mostrou o mais adequado para estudos futuros na perspectiva de montagem de fotômetro com ajustes de ganho de sinal visando sensibilidades obtidas aos equipamentos comerciais.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, M.C.U.; SANTOS, S.R.B; SILVA, E.A.; VERAS, G.; LIMA, J.L.F.C.; LAPA, A.S. Um fotômetro de fluxo para análises clínicas a base de um diodo emissor de luz bicolor. **Química Nova**, São Paulo, vol. 20, n. 2, p. 137-145, mar./abr. 1997. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=s0100-40421997000200004&script=sci_arttext. Acesso em: 23 jul. 2020.

MOREIRA, A.F.; SANTOS, S.R.B.; COSTA JUNIOR, A.G. Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de Beer-Lambert. **Holos**, Natal, vol. 2, p. 142-151, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481554865013.pdf>. Acesso em 23 jul. 2020.

PONTES, A.S. **Desenvolvimento de um fotômetro LED-Vis portátil e microcontrolado por Arduino**. 2014. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7136>. Acesso em: 25 jul. 2020.

SQUISSATTO, A.G.M. **Construção e aplicação de um fotômetro para o ensino da absorção da luz**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3418>. Acesso em: 25 jul. 2020.

CAPÍTULO 10

MORTE POR ELETROCUSSÃO NA REGIÃO NORDESTE ENTRE OS ANOS DE 2014 E 2019

Data de aceite: 22/02/2021

Daniela Asquidamini

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira, Paraná, Brasil

Carlos A. C. Jousseph

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira, Paraná, Brasil

Bruna Pontes Cechinel

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Medianeira, Paraná, Brasil

RESUMO: Este estudo faz uma análise de mortes por eletrocussão no período de 2014 a 2019 na região Nordeste. Destaca-se os estados da Bahia e Pernambuco com índices de 18,15% do total de óbitos que acontecem no Brasil. Para análise de dados foram elaborados gráficos de histograma e boxplot, fazendo as devidas comparações entre si. De modo geral, os testes apontam que os números de mortes estão relacionados aos períodos de férias escolares, festas natalinas, carnaval e reformas de residências, que compreendem os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, meses de maior número de acidentes fatais. Os dados são da Associação Brasileira de Conscientização para os perigos da eletricidade (ABRACOPEL).

PALAVRAS-CHAVE: Acidentes fatais. Eletricidade. Boxplot.

DEATH BY ELECTROCUTION IN THE NORTHEAST REGION BETWEEN THE YEARS 2014 AND 2019

ABSTRACT: This study makes an analysis of electrocution deaths from 2014 to 2019 in the northeast region. The Bahia and Pernambuco states reach, together, 18.15% of the total deaths that happen in Brazil. More details studies on this situation is required. For data analysis, histogram and boxplot graphs were made, making the appropriate comparisons. In general, the tests indicate that the death numbers are related to the periods of school holidays, Christmas parties, carnival and home renovation that comprises the December, January and February, months in which there is a growth in the number of fatal accidents. The data are from the Brazilian Electricity Hazards Awareness Association (ABRACOPEL).

KEYWORDS: Fatal accidents. Electricity. Boxplot.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem papel fundamental para o desenvolvimento da civilização, devendo proporcionar mais segurança, praticidade e conforto para as famílias e rapidez para as indústrias. Porém ao assistir as notícias, ou observar dados com estatísticas alarmantes sobre mortes causadas por eletrocussão, percebe-se a importância de haver mais pesquisas sobre os motivos de tantas mortes a fim de evitá-las, muitas vezes, com o cuidado em se manter informações sobre os perigos nos

locais corretos.

As estatísticas do corpo de bombeiros revelam que as instalações elétricas inadequadas feitas sem o cumprimento das normas e o mau uso da eletricidade são causas de acidentes graves, muitas vezes fatais, em incêndios prediais (Instalações Elétricas Prediais, p 190).

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi elaborado baseando-se em três anuários da Abracopel (Associação Brasileira de Conscientização para os perigos da Eletricidade). O primeiro anuário contém dados do ano de 2017, o segundo anuário possui dados de 2013 a 2018 e o terceiro anuário contém os dados de 2019. A Abracopel coleta os dados através de notícias em sites, redes sociais, blogs e mídias eletrônicas que, após verificar sua veracidade, passam a fazer parte de um banco de dados que se acumulam durante todo o ano.

As análises dos dados foram feitas mediante as principais estatísticas descritivas e gráficos (histograma e boxplot), com o objetivo de comparar diferenças significativas entre o número de mortes por eletrocussão na região Nordeste do Brasil, abrangendo vários estados nordestinos, com outras regiões do país. Segundo a Abracopel, estima-se que esses números sejam 3 a 5 vezes mais elevados devido ao fato de que muitos não são relatados ou atribuídos à eletricidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises exploratórias dos dados foram feitas através de planilhas eletrônicas e gráficos como o histograma e o boxplot. A tabela 1 indica o total de mortes por eletrocussão no território brasileiro nos últimos seis anos. Como pode-se observar, no ano de 2019 (697) houve um aumento de 12,06% no número de acidentes fatais comparado com o ano de 2018(622).

Ano	Total de mortes
2014	627
2015	590
2016	599
2017	627
2018	622
2019	697

Tabela 1 – Total de mortes no território brasileiro

Fonte: ABRACOPEL (2020).

A tabela 2 mostra o total de mortes por região nos últimos 6 anos. A região em que houve o maior número de casos foi o Nordeste (1631), que possui a média anual de 272 casos, seguido da região Sudeste (738). De acordo com a tabela, a região que apresenta o menor número de vítimas fatais é a região Norte (357). No ano de 2019, o Nordeste apresentou aumento de 9,96% no número de vítimas em relação a 2018.

Ano	Norte	Sul	Sudeste	Nordeste	Centro Oeste
2014	54	118	123	266	66
2015	54	94	109	259	74
2016	43	109	116	271	60
2017	52	98	125	287	65
2018	68	97	123	261	73
2019	86	109	142	287	73
Total	357	625	738	1631	411

Tabela 2 – Total de mortes por região entre 2014 e 2019

Fonte: ABRACOPEL (2020).

Conforme a figura 1 e a tabela 2, a região Nordeste representa, aproximadamente, 45,51% das mortes no país, seguido pelo Sudeste com 19,62%.

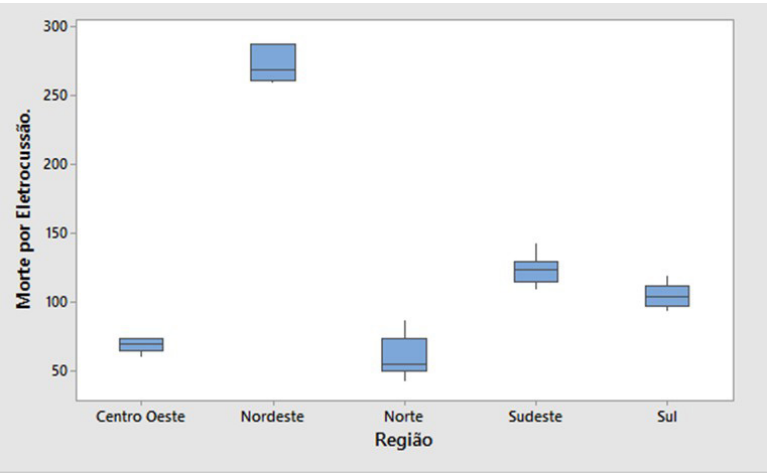


Figura 1 – Boxplot de mortes por eletrocussão versus região

Fonte: Autoria própria (2020).

A tabela 3 apresenta o total de mortes por estado da região Nordeste nos últimos 6 anos. O estado que apresenta mais mortes nesse período é a Bahia (401 mortes), seguido por Pernambuco (288 mortes).

Ano	AL	BA	CE	MA	PB	PE	PI	RN	SE
2014	28	68	35	19	20	51	26	14	5
2015	14	66	37	33	27	48	22	10	2
2016	21	67	26	30	33	43	30	14	7
2017	32	57	42	28	33	51	26	11	7
2018	21	60	38	23	27	45	33	7	7
2019	18	83	44	24	22	50	34	10	2
Total	134	401	222	157	162	288	171	66	30

Tabela 3 – Tabela de mortes por estado da região Nordeste
Fonte: ABRACOPEL (2020).

Conforme indicado na figura 2 e tabela 3, os estados que apresentam maior número de mortes por eletrocussão nos últimos 6 anos são Bahia e Pernambuco, que correspondem juntos a 42,24% de todas as mortes da região Nordeste e 18,31% de todas as mortes do território brasileiro.

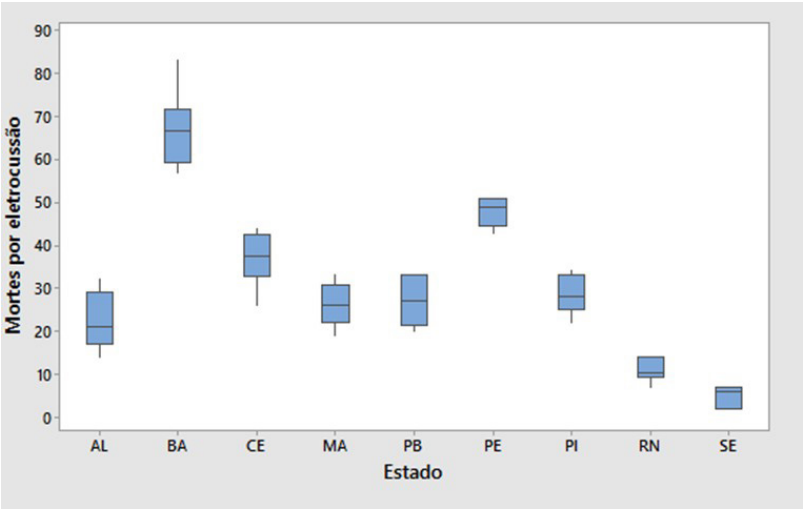


Figura 2 – Boxplot de mortes por eletrocussão versus estados nordestinos
Fonte: Autoria própria (2020).

A tabela 4 apresenta o total de mortes por mês na região Nordeste entre 2014 e 2019.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2014	66	70	58	55	41	64	32	29	33	62	64	53
2015	71	63	52	45	50	39	44	29	45	44	54	54
2016	70	60	56	61	32	42	40	36	39	50	41	72
2017	46	78	57	62	50	50	41	49	35	59	35	65
2018	68	78	62	58	40	46	38	31	35	43	57	66
2019	69	69	59	72	52	53	47	35	53	55	77	56
Total	390	418	344	353	265	294	242	209	240	313	328	366

Tabela 4 – Tabela de mortes por mês na região Nordeste

Fonte: ABRACOPEL (2020).

Segundo o resultado do boxplot (figura 3), os meses que ocorrem o maior número de mortes são dezembro, janeiro e fevereiro, que correspondem juntos a 31,18% do total de mortes por eletrocussão no Brasil. Nos mês de janeiro houve um índice discrepante, que corresponde ao ano de 2017, pois houve um número de mortes relativamente menor do que os anos anteriores e os anos seguintes.

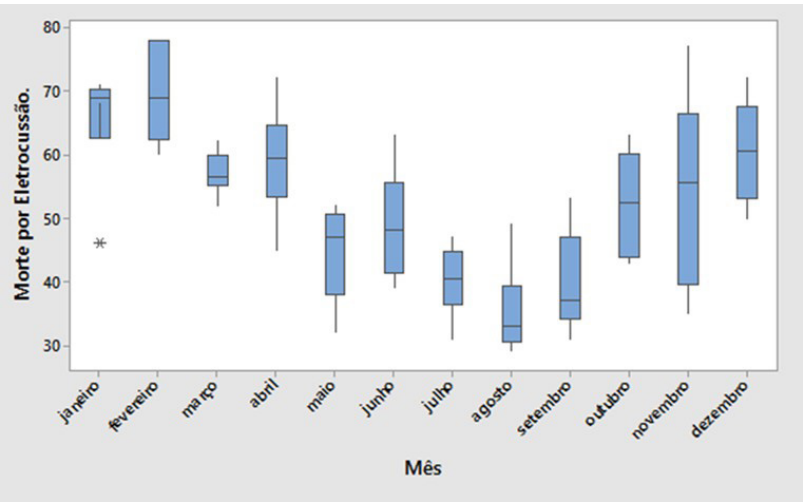


Figura 3 – Boxplot de mortes versus região

Fonte: Autoria própria (2020).

A curva da figura 4 apresenta forma platicúrtica, o que indica a não normalidade, ou seja, grande parte dos dados estão dispersos. Sendo platicúrtica, o coeficiente de dispersão é alto, em função da sazonalidade. Isso condiz com o índice de mortes ser mais acentuado em um dado período do ano, em detrimento de outro.

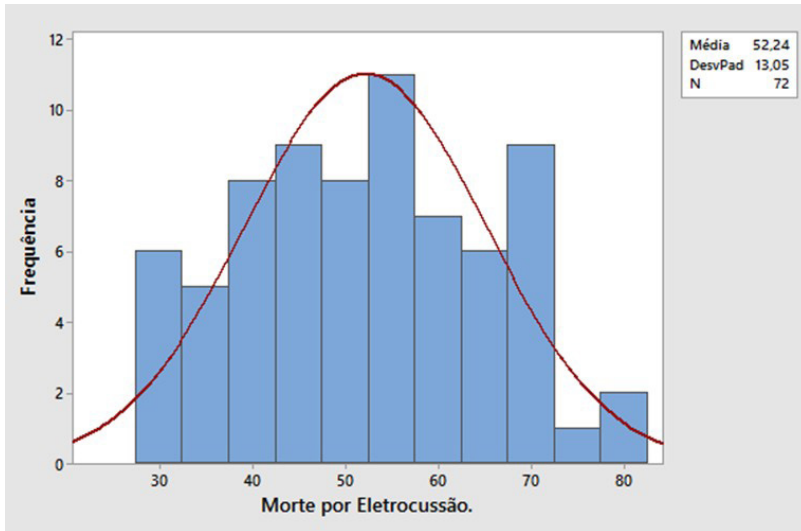


Figura 4 – Histograma

Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Este artigo mostrou a relação de acidentes fatais por choque elétrico no Brasil entre os anos de 2014 a 2019, dando ênfase aos estados e períodos de maior incidência. Evidenciou-se, através de gráficos e tabelas, a tendência de crescimento e decréscimo de eventos, o que sugerem sazonalidades.

Segundo a Abracopel, os índices de mortes por eletrocussão são maiores na região Nordeste, principalmente Bahia e Pernambuco, que são destinos turísticos nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e devido as datas de ocasiões festivas e culturais como o carnaval, ocasiona uma maior mobilização de pessoas. Outro fator que contribui para os altos índices de mortalidade nestas regiões, está relacionado aos fios de linhas de transmissão de energia que se encontram partidos/ou desencapados, muitas vezes devido ao grande número de pipas com cerol, o que pode ocasionar no corte dos fios.

Vale também destacar as instalações mal executadas, roubos de cabos, ligações de energia elétrica clandestinas diretamente das linhas de transmissão sem autorização da companhia elétrica, palanques e arquibancadas metálicas, carros alegóricos e trios

elétricos, que ocasionam a queda dos fios na rua, aliado a falta de manutenção das instalações elétricas. Considerando todos esses fatores, somado ao fato de existirem nas ruas pessoas sem a devida proteção, as vezes descalças, seja simplesmente caminhando ou os que fazem reformas residenciais sem o conhecimento nem o cuidado necessário, situações muitas vezes favorecidas neste período de dezembro a fevereiro pelas férias e 13º salário, pode-se entender as causas do grande número de mortes por eletrocussão, principalmente na região Nordeste.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por proporcionar conhecimento, em especial ao orientador Carlos Jousseph pelo apoio e suporte, e a Associação Brasileira de Conscientização para os perigos da Eletricidade (ABRACOPEL), por disponibilizar os dados e tentar mudar essa realidade.

DIREITO AUTORAL

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE.

Anuário Estatístico de acidentes de Origem Elétrica. 2017. Disponível em: <http://abracopel.org/wp-content/uploads/2019/05/ANU%C3%81RIO-ESTAT%C3%8DSTICO-ABRACOPEL-2018.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE.

Anuário Estatístico de acidentes de Origem Elétrica. 2019. Disponível em: <http://abracopel.org/wp-content/uploads/2019/05/Anu%C3%A1rio-ABRACOPEL-2019.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2019.

CERVELIN, S.; CAVALIN, G. **Instalações Elétricas Prediais**. 5. ed. Curitiba: Base Livros Didáticos Ltda, 2008. 554 p.

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA GERENCIAMENTO DO CONSUMO RESIDENCIAL DE ENERGIA

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 03/12/2020

Raphael de Aquino Gomes

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia – GO
<http://lattes.cnpq.br/4136576326278536>

Vinicius de Mello Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia – GO
<http://lattes.cnpq.br/8377639264902154>

Amanda Beatriz Mendanha Fernandes

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia – GO
<http://lattes.cnpq.br/1886259307479227>

Charles Lucas Santana de Souza

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia – GO
<http://lattes.cnpq.br/2444739525211175>

RESUMO: O Brasil é um dos maiores consumidores de energia elétrica do mundo, principalmente devido à sua dimensão territorial e grande população. Contudo, esse gasto não tem sido realizado de forma eficiente. O motivo principal desse fato é a pouca informação que é repassada ao usuário pela concessionária elétrica sobre os seus hábitos de consumo.

Diante disso, esse projeto tem como objetivo desenvolver uma solução de baixo custo para automação residencial, com foco em redução e medição do consumo de energia. Através do uso de Raspberry Pi, Arduino e equipamentos auxiliares, é proposta uma plataforma que possibilita interação entre o usuário e objetos da residência, dando-lhe liberdade para os controlar e ponderar seu consumo. Como resultado foi possível observar a eficácia da estrutura proposta e a facilidade na sua implementação.

PALAVRAS-CHAVE: Automação. Raspberry Pi. Arduino. Internet das Coisas.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW-COST SOLUTION FOR RESIDENTIAL ELECTRICITY CONSUMPTION MANAGEMENT

ABSTRACT: Brazil is one of the largest consumers of electricity in the world, mainly due to its territorial dimension and large population. However, this expense has not been made efficiently. The main reason for this is the little information that is passed on to the user by the electric utility about their consumption habits. Therefore, this work aims to develop a low-cost solution for home automation, with a focus on reducing and measuring energy consumption. Through the use of Raspberry Pi, Arduino, and auxiliary equipment, a platform is proposed that allows interaction between the user and objects in the home, giving them the freedom to control them and reason about their consumption. As a result, it was possible to observe the effectiveness of the proposed structure and the easiness of its implementation.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil com seu extenso território e condições ímpares de clima e recursos naturais possui uma grande capacidade de geração de energia elétrica. De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de eletricidade nacional no ano de 2019 foi equivalente a 482.085 GWh, o que representa um aumento de 1,4% se comparado ao ano anterior (EPE, 2019). O crescimento do consumo de energia, embora possa representar o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos. Um dos principais impactos negativos dessa atividade é sobre o meio ambiente, através da poluição, até esgotamento dos recursos naturais utilizados. Uma das formas mais promissoras e que tem sido usada amplamente para conter a expansão do consumo sem comprometer qualidade de vida e desenvolvimento econômico tem sido o estímulo ao uso eficiente.

Em busca do consumo eficiente é necessário que se tenha o máximo de informações possíveis sobre o equipamento que se está utilizando e seu tempo de funcionamento. As empresas de distribuição de energia elétrica apresentam todo mês às pessoas o equivalente monetário aos seus gastos enérgicos daquele período. Contudo, esses dados não possuem a precisão necessária para proporcionar a instrumentação de ações que levem a um consumo eficaz. Isso ocorre principalmente devido a dois fatores: os dados passados pela concessionária serem muito gerais e espaçados entre si e a dificuldade que o consumidor tem de compreender essas informações.

Com o avanço constante da tecnologia, são desenvolvidas novas ferramentas que auxiliam em diversas ações do cotidiano. Dentre estas podem ser citadas aquelas relacionadas à Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), que possibilitam a integração de vários objetos físicos, que se comunicam entre si através da internet. Cada um dos objetos conectados à Internet possui um endereço de protocolo de IP específico, e por meio desse endereço pode ser acessado para receber instruções. Além disso, também pode contatar um servidor externo e enviar os dados coletados, em a necessidade de interação entre humanos ou de humanos com computador (HAQUE et al., 2019).

IoT integra comunicações ubíquas, computação pervasiva e inteligência no ambiente, fornecendo a base para muitas novas aplicações. De maneira significativa, uma de suas ramificações são as Smart Grids (SG), ou redes elétricas inteligentes, que podem ser definidos como a utilização de dispositivos inteligentes na rede responsável pelo transporte de energia. O principal dispositivo a ser aplicado à rede é o medidor inteligente que, diferente do medidor comum, é capaz de processar os dados e, a partir deles, controlar outros dispositivos.

Neste capítulo é discutido como tecnologias de IoT podem ser utilizados para

desenvolver um componente da rede elétrica inteligente de baixo custo e acessível a todos, capaz de proporcionar o controle e redução do consumo. Outro objetivo é oferecer uma interface acessível a pessoas com diferentes necessidades, possibilitando seu uso por portadores de necessidades especiais ou àqueles que não possuem conhecimento tecnológico avançado.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos utilizados como fonte de estudo para o desenvolvimento da pesquisa associada. Logo após serão detalhados as tecnologias utilizadas no desenvolvimento da solução proposta. Em seguida, a arquitetura e implementação são discutidas, detalhando as especificidades e a forma de interação dessas tecnologias. Resultados relacionados à simulação da ferramenta proposta são apresentados em sequência. Por fim, considerações finais são apresentadas, com a ponderação sobre possíveis trabalhos futuros.

2 | TRABALHOS RELACIONADOS

Uma vez que a demanda por eletricidade está aumentando dia após dia, a proposição de automação voltada ao desenvolvimento de casas inteligentes é cada vez mais objeto de pesquisa, buscando fornecer acesso remoto para controle de eletrodomésticos usando IoT (KUNG et al., 2018; BHATNAGAR et al., 2018; PAVITHRA; BALAKRISHNAN, 2015). Como exemplo, a automação residencial usando o protocolo *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) (HUNKELER et al., 2008) é proposta por Upadhyay et al. (2016) para enviar/receber dados de sensores. Para isso, Raspberry Pi é adotado como um portal para acessar os dados do sensor que são usados para medir a temperatura e umidade de um ambiente. Outro sistema de automação residencial também baseado no uso de Raspberry Pi é apresentado por Pavithra e Balakrishnan (2015), através do qual o usuário pode controlar seus eletrodomésticos usando uma interface baseada na web.

Brito (2016) propôs uma solução para monitorar o consumo de energia elétrica em tempo real. Os dados são obtidos através do sensor SCT-013 e são tratados através de um circuito adicional visando precisão maior. Também foi utilizado o Arduino junto de um Ethernet Shield, que envia os dados para uma plataforma em nuvem. Por sua vez, Agyeman et al. (2019) trazem um projeto bem próximo do aqui apresentado, com o Arduino realizando as leituras através de sensores e um Raspberry Pi sendo usado para implementar a unidade central. A maior diferença entre estes trabalhos e o que é aqui apresentado se dá ao fato da utilização da Alexa para o controle por voz.

Em outros trabalhos, diferentes assistentes de voz como Siri e Bixby também são utilizados (HOY, 2018), mas dentro de todas as opções Alexa continua sendo a melhor decisão porque a Amazon permite implementar mais ações permitindo desenvolver projetos interessantes, como mencionado por Aravindan e James (2017). Nessas pesquisas, Alexa é o *middleware* para o sistema de domótica/IoT; embora também haja propostas como de

Putthapipat et al. (2018), onde a Interface de Programação de Aplicações do Google é usada para a fala em texto que será processado pelo Raspberry Pi.

3 | TECNOLOGIAS DE IOT RELACIONADAS

Em uma solução baseada em Internet das Coisas é essencial que todos os equipamentos possam compartilhar dados entre si. Para isso é necessário o uso de diferentes dispositivos e serviços. A seguir é apresentado algumas das tecnologias que podem ser utilizadas para a implementação de soluções nesse cenário.

Arduino é uma placa integrada com um microcontrolador, normalmente da Atmel (OLIVEIRA, 2017). Utiliza alimentação de 5 volts e portas de entrada e saída que permitem a conexão de dispositivos eletrônicos. Através deste dispositivo é possível desenvolver diferentes aplicações, com diferentes graus de complexidade, desde acender um *led* a controlar um sistema de resfriamento utilizando sensores de temperatura, por exemplo.

Raspberry Pi (UPTON; HALFACREE, 2012) é um microcomputador de baixo custo integrado totalmente em uma placa. Apresenta portas de entrada e saída como o Arduino porém níveis diferentes de tensão já que ele trabalha com 3.3 volts. Permite conexão por Bluetooth e Wi-Fi.

Relé é um dispositivo eletromecânico que, quando percorrido por uma corrente em sua bobina, gera um campo eletromagnético que atrai um de seus contatos, ocorrendo a comutação, ou seja, um movimento mecânico que abre ou fecha os contatos. Caso a corrente seja interrompida o componente volta ao seu estado anterior. No relé pode-se escolher uma ligação NA (os contadores normalmente abertos) ou NF (os contadores normalmente fechados) definindo se o circuito começará ligado ou desligado (MUNDO DA ELÉTRICA, 2020).

Sensores de corrente são dispositivos que por meio de ligação ao circuito, reagem produzindo um sinal elétrico proporcional em sua saída. Dentre os dispositivos desta categoria que são voltados para a análise de consumo energético podem ser citados os modelos SCT-013-100A e ACS712-30A. O primeiro é um sensor de corrente não invasivo, ou seja, não é necessário causar modificações no circuito para manuseá-lo. Este apresenta leituras de até 100A em corrente alternada e em sua saída uma corrente máxima de 0.5A. Para utilizá-lo basta envolver o sensor em apenas um dos condutores do circuito (THOMSEN, 2015). O sensor ACS712, por sua vez, é um sensor invasivo, ou seja, para obter uma leitura de corrente é necessário realizar ligações elétricas com o circuito. Ele utiliza o efeito Hall, tendo em sua saída algum valor de tensão proporcional à sua entrada. Diferente do SCT-013, este pode realizar leituras de sistemas elétricos contínuos.

Alexa (AMAZON, 2020b) é uma assistente virtual da Amazon baseada em inteligência artificial com reconhecimento por voz. Esta assistente foi lançada pela Amazon com seu alto-falante doméstico conectado Echo em 2014. Contudo, a interação com a assistente

pode ser realizada através de outros equipamentos utilizando Alexa Voice Service (AVS), um o pacote de serviços da Amazon. Utilizando esta assistente é possível configurar alarmes, criar listas, obter informações sobre algum lugar, e torná-lo o centro da automação residencial, controlando os dispositivos ao redor. Através de alguns serviços da Amazon, é possível criar “Skills”, aplicativos ativados por voz, incluindo no-vas funcionalidades ao sistema.

Amazon Web Services (AWS) (AMAZON, 2020a) é uma plataforma que fornece serviços de computação em nuvem para diferentes regiões geográficas em todo o mundo. A AWS estreou em 2006, e desde então funciona como um provedor de serviços online para diferentes aplicações baseadas em nuvem. Com relação ao escopo deste trabalho, o principal serviço relacionado é o IoT Core, que permite a conexão fácil e segura de dispositivos a aplicativos de nuvem e a outros dispositivos, assim como ao serviço de voz Alexa. Outro serviço relevante é o Amazon DynamoDB que oferece bases de dados NoSQL de chave-valor e documento que oferece desempenho de milissegundos com um dígito em qualquer escala. No DynamoDB pode ser criado uma regra para persistir as informações recebidas de um mensageiro MQTT no banco de dados. Por fim, o Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) é um serviço que disponibiliza capacidade computacional majoritariamente através de máquinas virtuais.

4 | ARQUITETURA DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Nesta seção é apresentada a arquitetura de uma solução de automação residencial voltada para a análise de padrão e redução de consumo de energia. Apesar da existência de soluções comerciais equivalentes, elas geralmente possuem um custo elevado sendo inacessível para a grande parcela da população. Dessa forma, a solução proposta visa oferecer uma alternativa de baixo custo utilizando ferramentas de IoT.

A Figura 1 apresenta a arquitetura proposta. Um dos principais desafios na implementação da solução proposta foi definir como seriam realizadas as leituras de um dispositivo elétrico ou circuito, assim como estabelecer os mecanismos de interação com o usuário. Diante dos objetivos estabelecidos, foi adotada a utilização do Raspberry Pi por seu custo-benefício e a vantagem de todas as possibilidades que ele traria, como a possibilidade de interação por voz. Dessa forma, ele foi escolhido para ser a plataforma física que suporta o serviço da Alexa, junto ao AVS, permitindo o registro de habilidades customizadas. As informações do Alexa Skill são transportadas de forma direta e segura pelo túnel da rede privada virtual (*Virtual Private Network* – VPN) Ngrok (NGROK, 2020), assim que as informações chegam ao Raspberry Pi.

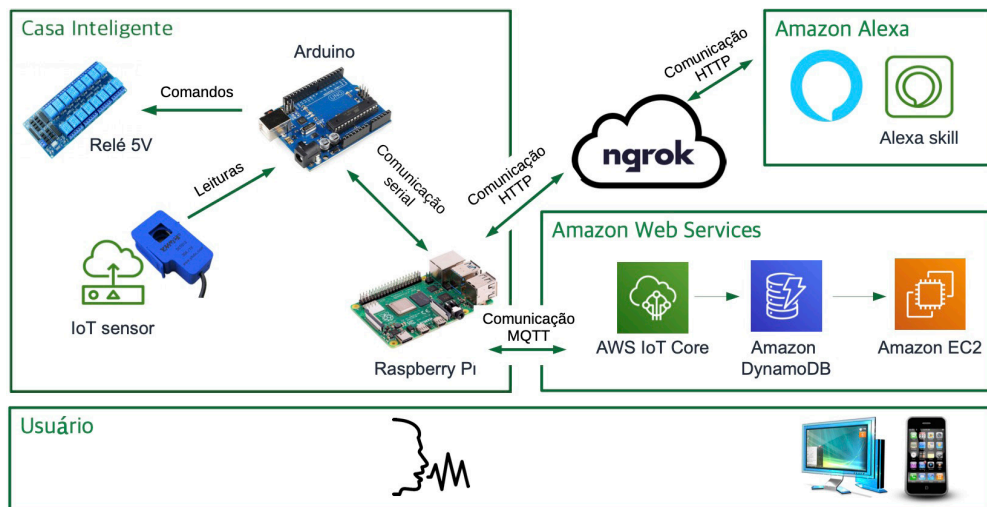


Figura 1: Arquitetura de uma solução para gerenciamento do consumo de energia.

Outro papel assumido pelo Raspberry Pi é representar o dispositivo de borda através do qual as informações coletadas são enviadas para a plataforma de nuvem. Além do serviço AWS IoT Core que coleta os dados enviados, o serviço AWS DynamoDB é usado para armazená-los, ao passo que o serviço AWS EC2 é usado para implantação de um serviço Web para visualização e como forma adicional de interação com o usuário.

A plataforma Arduino foi estabelecido como mecanismo de coleta de dados através dos sensores, pela sua praticidade e baixo custo. De maneira complementar, com este microcontrolador se buscou uma forma de controlar os equipamentos com uma programação simples e de baixo custo. Os sensores conectados a um sistema elétrico, fazem o envio dos dados para o Arduino, enquanto este envia o comando para ligar e desligar o relé.

A troca de dados e comandos entre o Arduino e o Raspberry Pi ocorre por comunicação serial. Com isso, o dispositivo pode enviar os comandos de ação ao Arduino ou receber os dados do sensor para serem entregues à nuvem.

5 | IMPLEMENTAÇÃO

Para a definição de quais sensores seriam utilizados foi analisado a eficiência e formas de conexão no sistema. Foram considerados os modelos SCT-013-100A (não invasivo) e ACS712-30A (invasivo). Diversos testes foram realizados utilizando o Arduino e um display LCD, medindo a corrente de diversos equipamentos como luminárias e ventiladores. Além das leituras, ocorreram testes com o relé para ligar e desligar objetos em um tempo predeterminado. Após adaptações, um serviço foi implantado no microcontrolador da Atmel que, através da comunicação serial com o Raspberry Pi, realizava constantes leituras do sensor de corrente e os transmitia para o microcomputador. Para facilitar as leituras

das correntes foi utilizada a biblioteca EmonLib (OEM, 2020). Ainda, o serviço implantado permite a comutação do dispositivo de chaveamento como resposta a comandos enviados.

Com relação à interação com o usuário foi necessário a instalação do AVS no Raspberry Pi. Com o serviço em funcionamento no microcomputador foi necessário estabelecer quais skills seriam necessárias. Com isso, utilizando o site do desenvolvedor, foram criados os comandos que o Raspberry Pi enviaria para o Arduino agir como atuador. Foi possível disponibilizar um vocabulário diversificado para que ela execute o comando desejado. Na Figura 2 é mostrado as diversas palavras que podem ser ditas para chamar a intenção de leitura que, quando acionada, fará o Raspberry Pi requisitar os dados de leitura do sensor para o Arduino. Uma intenção é a representação de uma ação, solicitadas pelo usuário (KITAMURA, 2020). Como pode ser observado na figura, é facilmente possível adicionar ou excluir palavras.

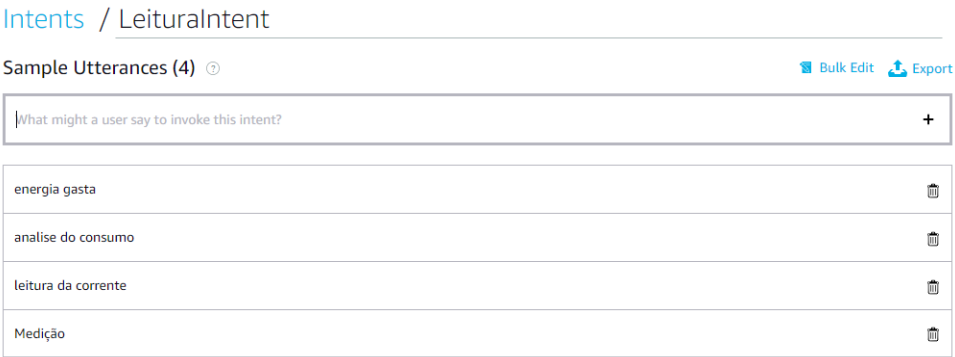


Figura 2: Interface das palavras para a intenção de medição.

A execução dos comandos representados pelas intenções é coordenada por um script Python que executa no Raspberry Pi fazendo a intermediação entre o Arduino e Alexa. Este script recebe uma das intenções, transmite o comando por comunicação serial como um valor numérico inteiro que será interpretado pelo Arduino, que realizada a tarefa especificada pelo usuário. Neste script também está incluído as instruções de interação com o Ngrok.

O protocolo escolhido para realizar a comunicação entre o Raspberry Pi e a nuvem foi o MQTT, por ser uma opção leve que permite a implementação em hardware de dispositivos muito limitados e em redes com pouca largura da banda e alta latência. O MQTT faz uso de dois tipos de entidade na rede: o broker e os diversos clientes. O Raspberry Pi no cenário proposto assume o papel de cliente, publicando as mensagens em um tópico. O tópico, por sua vez, contempla os dados do sensor de corrente conectado no Arduino.

Os dados recebidos são armazenados no DynamoDB para posteriormente serem

informados aos usuários através da interface web implantada em uma instância do AWS EC2. Esta interface permite ao usuário visualização em tempo real dos dados enviados para nuvem da AWS, mostrando informações pertinentes ao dispositivo como, por exemplo, se certo equipamento está ligado ou desligado. Constitui uma aplicação que pode ser acessada em qualquer dispositivo por meio de um navegador. Foi desenvolvida utilizando HTML, CSS e JavaScript. Parte da aplicação é mostrada na Figura 3.

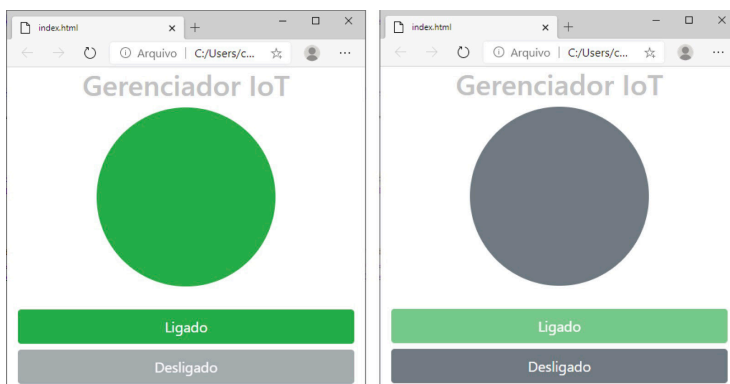


Figura 3: Parte da interface Web.

Na solução o serviço AWS IoT Core foi definido como *broker*. Sua função é intermediar as mensagens que um cliente publica as enviando apenas para aqueles clientes que as assinam. Para isso, o Raspberry Pi foi registrado como uma coisa no serviço.

Durante o desenvolvimento da solução proposta houve alguns empecilhos que merecem ser relatados. Um dos mais representativos foi a dificuldade em instalar o AVS no Raspberry Pi, por conta de sobreaquecimento do hardware ocasionando em seu travamento. Foi necessário a reinicialização, para solucionar este problema. Para superar este desafio foram instaladas partes do arquivo do processo separadamente e a utilização de um resfriador adaptado.

6 | SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A implantação da solução desenvolvida pode ser visualizada na Figura 4. Do lado esquerdo estão os principais componentes, ao passo que no lado direito os componentes de medição são destacados.

Para ilustrar parte dos resultados possíveis, na Figura 5 são apresentados as leituras de consumo de energia por parte de alguns equipamentos. As leituras foram realizadas com uma frequência de uma leitura por minuto durante o intervalo de uma hora. Como pode ser visto na figura, a ferramenta possibilita a leitura de equipamentos individuais ou combinados.



Figura 4: Implantação do protótipo desenvolvido.

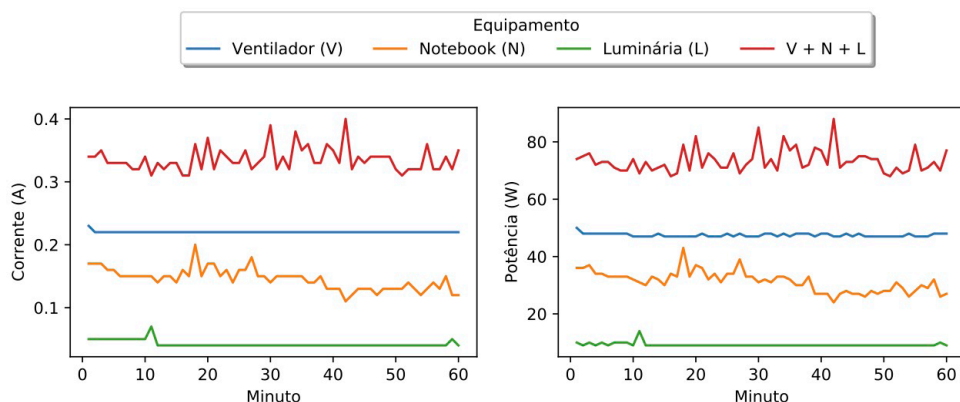


Figura 5: Monitoramento do consumo de energia dado pela ferramenta.

Como outros resultados, durante o desenvolvimento da solução foram analisadas adaptações na arquitetura como a utilização do sistema sem a necessidade da conexão com a rede elétrica. Contudo, o Raspberry Pi apresenta um consumo elevado para manter o suprimento através de fontes alternativas, como baterias.

Uma vez que o principal objetivo da proposta era desenvolver uma solução de baixo custo, a Tabela 1 descreve o valor gasto para implementar este protótipo, considerando cotação realizada em setembro de 2020. Nela são listados os preços médios do mercado dos principais componentes utilizados. O sensor de corrente considerado foi o modelo SCT-013 por ser mais acessível sua aplicação em diversos circuitos. Como pode ser visto, é possível se obter uma plataforma completa de automação a um custo bem mais acessível que soluções semelhantes encontradas no mercado.

Equipamento	Valor R\$
Raspberry Pi	348
Arduino	41.4
Microfone	97
Sensor de corrente	41.7
Relé	9.6
Total	537.7

Tabela 1 – Custo do protótipo desenvolvido.

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho se mostra possível, a um baixo custo, desenvolver uma solução que auxilia no monitoramento de uso de energia e que oferece mecanismos de automação residencial. A solução apresentada promove uma maior interação entre o morador e sua residência, permitindo que esse explore funcionalidades através de IoT, como o controle remoto de atividades básicas da casa.

O escopo deste projeto teve como foco a análise de uso da energia elétrica, pois é um tema deveras abordado nos dias atuais, já que a humanidade possui recursos finitos e o consumo elétrico continua aumentando. Com isso, é necessário encontrar uma solução para diminuir esse gasto, trazendo a população mais próximo disto, possibilita um uso mais inteligente, evitando perdas desnecessárias.

Para trabalhos futuros é interessante encontrar uma solução mais viável para a comunicação entre o Alexa e o Raspberry Pi do que a utilização por Ngrok. Apesar de ter sido satisfatório neste projeto pela facilidade com é realizada a interação entre as tecnologias, é desfavorável em um projeto real pela necessidade de configuração a cada reinicialização do microcomputador.

Também é interessante analisar a utilização de meios alternativos de geração de energia, alimentando o sistema através de fontes renováveis como a eólica e fotovoltaica, tornando a plataforma independente da rede elétrica. Também é possível verificar a possibilidade de utilizar este trabalho para a análise de sistemas fotovoltaicos, obtendo leituras instantâneas e as repassando ao usuário sobre a energia gerada.

Outro desdobramento interessante seria utilizar o serviço Amazon Kinesis Data Streams para processamento em tempo real com escalabilidade massiva e resiliência, sendo possível capturar continuamente gigabytes de dados por segundo de centenas de milhares de origens e o Kinesis Data Analytics para análise de dados em tempo real com capacidade de dimensionar automaticamente para atender ao volume e à transferência de dados recebidos.

REFERÊNCIAS

AGYEMAN, M. O.; AL-WAISI, Z.; HOXHA, I. **Design and implementation of an iot-based energy monitoring system for managing smart homes**. In: IEEE. 2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). [S.l.], 2019. p. 253–258.

AMAZON. **Amazon Web Services**. 2020. Disponível em: <<https://aws.amazon.com>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

_____. **What Is Alexa?** 2020. Disponível em: <<https://developer.amazon.com/alexa>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

ARAVINDAN, V.; JAMES, D. **Smart homes using internet of things**. International Research Journal of Engineering and Technology, p. 1725–1729, 2017.

BHATNAGAR, H. V.; KUMAR, P.; RAWAT, S.; CHOUDHURY, T. **Implementation model of wi-fi based smart home system**. In: IEEE. 2018 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE). [S.l.], 2018. p. 23–28.

BRITO, J. L. G. de. **Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino**. Londrina: Departamento de Engenharia Elétrica/Universidade Estadual de Londrina, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal: consumo nacional de eletricidade em dezembro cresceu 2% em relação ao mesmo mês de 2018**. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-consumo-nacional-de-eletricidade-em-dezembro-cresceu-2-em-relacao>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

HAQUE, M. S. T.; ROUF, K. A.; KHAN, Z. A.; EMRAN, A.; ZISHAN, M. S. R. **Design and implementation of an iot based automated agricultural monitoring and control system**. In: IEEE. 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). [S.l.], 2019. p. 13–16.

HOY, M. B. **Alexa, Siri, Cortana, and more: An introduction to voice assistants. Medical reference services quarterly**, Taylor & Francis, v. 37, n. 1, p. 81–88, 2018.

HUNKELER, U.; TRUONG, H. L.; STANFORD-CLARK, A. **MQTT-S – A publish/subscribe protocol for wireless sensor networks**. In: IEEE. 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE'08). [S.l.], 2008. p. 791–798.

KITAMURA, C. **O Que É Intent (Intenção)?** 2020. Disponível em: <<https://celsokitamura.com.br/o-que-e-intent/>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

KUNG, Y.-F.; LIOU, S.-W.; QIU, G.-Z.; ZU, B.-C.; WANG, Z.-H.; JONG, G.-J. **Home monitoring system based internet of things**. In: IEEE. 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI). [S.l.], 2018. p. 325–327.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Como funciona um relé? O que é um relé?** 2020. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-um-rele-o-que-e-um-rele/>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

NGROK. **What is ngrok?** 2020. Disponível em: <<https://ngrok.com/product>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

OLIVEIRA, S. de. **Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. [S.l.]: Novatec Editora, 2017.

OPENENERGYMONITOR. **Arduino Energy Monitoring Library**. 2020. Disponível em: <<https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

PAVITHRA, D.; BALAKRISHNAN, R. **IoT based monitoring and control system for home automation**. In: IEEE. 2015 global conference on communication technologies (GCCT). [S.l.], 2015. p. 169–173.

PUTTHAPIPAT, P.; WORALERT, C.; SIRINIMNUANKUL, P. **Speech recognition gateway for home automation on open platform**. In: IEEE. 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). [S.l.], 2018. p. 1–4.

THOMSEN, A. **Como fazer um medidor de energia elétrica com Arduino**. 2015. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/medidor-de-energia-eletrica-com-arduino/>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

UPADHYAY, Y.; BOROLE, A.; DILEEPAN, D. **MQTT based secured home automation system**. In: IEEE. 2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN). [S.l.], 2016. p. 1–4.

UPTON, E.; HALFACREE, G. **Meet the Raspberry Pi**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO ESTÁGIO DE SAÍDA DE UM GERADOR DE ONDAS ARBITRÁRIAS

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 30/12/2020

Daiany Besen

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo, Paraná
<http://lattes.cnpq.br/8807309716564389>

Felipe Walter Dafico Pfrimer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo, Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6926615137451062>

Alberto Yoshihiro Nakano

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo, Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7663994105896731>

RESUMO: O gerador de sinais é uma importante ferramenta de testes em circuitos eletrônicos pois é capaz de gerar sinais elétricos em forma de tensão. Entretanto, apresenta limitação quanto as formas de onda de saída, que geralmente são as mais comuns: senoidal, triangular e quadrada. Para aplicações que necessitam de sinais mais complexos, além das formas comuns, utiliza-se um gerador de ondas arbitrárias que é capaz de gerar sinais totalmente configurados pelo usuário. Dentro do gerador arbitrário o estágio de saída realiza uma etapa essencial, que é o ajuste de amplitude e *offset* do sinal. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do estágio de saída de baixo custo e de hardware aberto em que o usuário possa digitar os valores de amplitude e *offset* por meio de uma interface

para computador. Para o desenvolvimento foram utilizados dois conversores digital para analógico (DAC) que serão responsáveis por controlar os valores de amplitude e *offset* do sinal de saída. Os resultados obtidos apresentam resposta satisfatória, visto que a comunicação entre computador, microcontrolador e DACs é estável e ainda a simulação dos circuitos analógicos apresentam boa resposta.

PALAVRAS-CHAVE: Gerador de ondas arbitrárias. Estágio de saída. DAC. AD633.

STUDY AND DEVELOPMENT OF THE EXIT STAGE OF AN ARBITRARY WAVES GENERATOR

ABSTRACT: The signal generator is an important test tool in electronic circuits because it is capable of generating electrical signals in the form of voltage. However, it has limitations in terms of output waveforms, which are generally the most common: sinusoidal, triangular and square. For applications that require more complex signals, in addition to the common forms, an arbitrary wave generator is used that is capable of generating signals fully configured by the user. Within the arbitrary generator, the output stage performs an essential step, which is the adjustment of the amplitude and *offset* of the signal. Thus, the objective of this work is the development of the low-cost, open hardware output stage in which the user can enter the amplitude and *offset* values through a computer interface. For the development, two digital to analog converters (DAC) were used, which will be responsible for controlling the amplitude and *offset* values of the output signal. The results obtained have a

satisfactory response, since the communication between computer, microcontroller and DACs is stable and the simulation of analog circuits has a good response.

KEYWORDS: Arbitrary wave generator. Output stage. DAC. AD633.

1 | INTRODUÇÃO

Um gerador de sinais é um equipamento eletrônico amplamente utilizado como ferramenta de testes em circuitos elétricos. Tal equipamento é capaz de gerar sinais em forma de tensão, que então serão conectados na entrada de um sistema a ser testado.

Entretanto, o gerador de sinais apresenta limitação quanto as formas de onda de saída, que geralmente são as mais comuns: senoidal, triangular e quadrada; e também limitação dos parâmetros que podem ser configurados nesses sinais: amplitude, *offset* e frequência. Para aplicações que necessitem de estímulos mais complexos em sua entrada, se faz necessário a criação de sinais além das formas comuns. Nesse caso recorre-se a um gerador de ondas arbitrárias, que se trata de um equipamento capaz de gerar sinais totalmente configurados pelo usuário, não só nos parâmetros já citados, mas também na sua forma (SANTOS; LAMPA, 2018, p. 16-17).

Segundo Reichert e Moreto (2017, p. 24) o gerador de ondas arbitrárias pode utilizar diversas técnicas para a geração dos sinais, porém, esses sinais são apenas uma base, com a forma e frequência desejadas. Nesse cenário o estágio de saída exerce um papel muito importante pois é nele em que o sinal pode ser amplificado e ter adicionado um nível CC (corrente contínua), geralmente designada como tensão de *offset*.

Nesse artigo será apresentado o desenvolvimento do estágio de saída de um gerador de ondas arbitrárias de baixo custo, de hardware aberto e que possui controle digital, onde o usuário seleciona os valores de amplitude e *offset* por meio de uma interface para computador pessoal (PC). Para o desenvolvimento, foram utilizados dois conversores digital-analógico (DAC), um para configurar amplitude do sinal de saída e o outro para o *offset*.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A construção do estágio de saída proposto está esquematizada no diagrama de blocos da Figura 1.

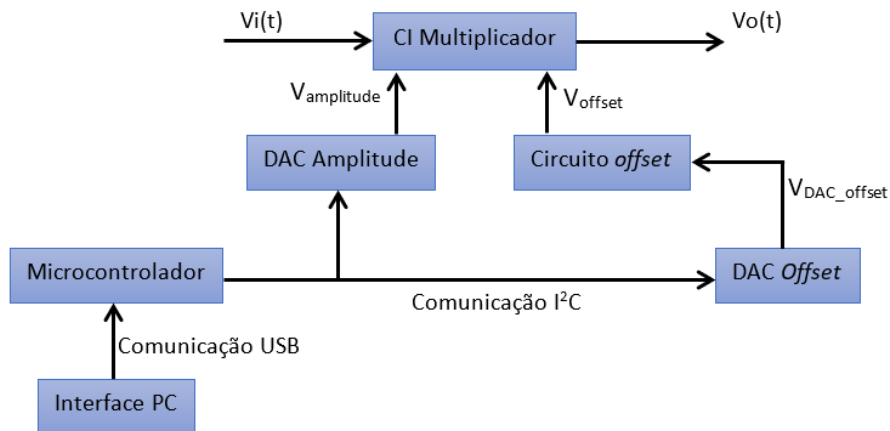


Figura 1 - Diagrama de blocos do estágio de saída.

Fonte: Autoria própria (2020).

O sinal de entrada do estágio de saída, $V_i(t)$, é um sinal normalizado e de amplitude fixa que provém da técnica utilizada para geração de sinais arbitrários. Para o ajuste de amplitude, deve ocorrer a multiplicação do sinal $V_i(t)$ pelo sinal de tensão contínua $V_{amplitude}$. Essa multiplicação é feita pelo circuito integrado (CI) multiplicador AD633, que também faz o ajuste de *offset* ao somar a tensão V_{offset} . Todo este processo originará o sinal de saída $V_o(t)$.

O CI AD633 que possui diagrama interno mostrado na Figura 2 é um multiplicador de baixo custo que realiza multiplicação nos quatro quadrantes, possui alta impedância, entradas diferenciais X (X_1 e X_2) e Y (Y_1 e Y_2) e uma entrada somadora Z (ANALOG DEVICES, 2015).

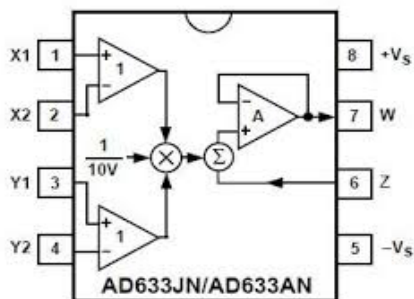


Figura 2 - Diagrama interno do CI AD633.

Fonte: Analog Devices (2015).

O componente possui a seguinte equação de saída:

$$V_o = \frac{(X1-X2)*(Y1-Y2)}{10} + Z \quad (1)$$

Fixando X2 e Y2 na referência do circuito, Y1 como o sinal V_i , X1 como $V_{amplitude}$ e Z como V_{offset} tem-se:

$$V_o = \frac{V_i * V_{amplitude}}{10} + V_{offset} \quad (2)$$

Sabendo que a equação (2) também é a equação de saída do estágio de saída, a primeira parte é referente ao controle de amplitude do sinal e a segunda parte ao controle de *offset*.

As tensões $V_{amplitude}$ e V_{offset} que fazem o controle do valor final de amplitude e *offset* do sinal são controladas por dois diferentes DACs, dispositivos que fazem a transformação de um sinal digital para uma saída em tensão analógica. Os DACs recebem informação digital de um microcontrolador através de um barramento I²C de comunicação.

Para o desenvolvimento do projeto foi utilizado o dispositivo MCP4725, um módulo DAC de 12 bits produzido pela Microchip. Esse módulo possui saída analógica em tensão, alta precisão, memória não volátil (EEPROM) e interface I²C de comunicação (MICROCHIP, 2009).

Uma característica importante do DAC é sua resolução, ou seja, a menor variação de tensão que pode ocorrer na saída analógica. A resolução do MCP4725 é dada pela equação:

$$R = \frac{V_{ref}}{4096} \quad (3)$$

Sendo que 4096 se refere a quantidade de níveis de tensão que o DAC de 12 bits pode gerar. A tensão de referência V_{ref} deve ser a mesma tensão de alimentação do microcontrolador e também máxima tensão que o dispositivo pode gerar.

Outra equação importante para o desenvolvimento é equação de saída do DAC, que é dada por:

$$V_{out} = \frac{V_{ref} * Dn}{4096} \quad (4)$$

A equação (4) relaciona uma entrada digital Dn, que vai de 0 a 4095, com a saída analógica V_{out} .

Para o envio de dados para os DACs o protocolo de comunicação I²C foi programado no microcontrolador MSP430G2553 utilizando linguagem C.

De acordo com Braga (2020) a comunicação I²C é uma comunicação serial e síncrona; é formada por duas vias, a de dados SDA e a de *clock* SCL. Todos os dispositivos são conectados em paralelo no barramento, tanto mestre como escravos, e por isso

obrigatoriamente cada escravo deve possuir um endereço diferente. Só foi possível utilizar dois módulos DAC idênticos no mesmo barramento porque o fabricante disponibiliza uma alteração física do endereço dos módulos configurada através da tensão digital em um pino.

Sabendo que cada dispositivo DAC pode gerar tensões entre 0 V e 3,3 V, e que estes fazem o controle dos valores de amplitude e *offset*, não seria possível gerar valores de *offset* negativos caso tensão V_{offset} fosse tomada diretamente do DAC. Para resolver a problemática, foi desenvolvido um circuito utilizando amplificadores operacionais do tipo TL074, que possibilita a geração de tensões positivas e negativas de *offset* e ainda dá um ganho maior a essas tensões.

O circuito tem como entrada a tensão V_{DAC_offset} , que é a tensão gerada pelo DAC, e como saída V_{offset} tensão que será somada no AD633. Seu funcionamento é baseado no intervalo de tensão gerada pelo conversor; quando o DAC gerar tensão entre 0 V e 1,65 V o circuito converterá entre um intervalo de -13,2 V à 0 V e quando o DAC gerar tensões entre 1,65 V à 3,3V o circuito resultará em um intervalo de 0 V à 13,2 V.

Com a etapa de desenvolvimento dos circuitos analógicos finalizada pode-se partir para a criação da interface para computador pessoal.

A proposta foi desenvolver uma interface simples e de fácil utilização que tem por finalidade enviar valores digitais de amplitude e *offset* digitadas pelo usuário. Essa interface foi criada na linguagem de programação Python utilizando o módulo pyserial que conta com inúmeras ferramentas para envio e recebimento serial de dados pela conexão USB do computador.

Para receber os dados seriais vindo da interface foi necessário programar o protocolo para comunicação serial UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) no microcontrolador. O protocolo UART é uma comunicação serial e assíncrona a dois fios, um de recepção Rx e o outro de transmissão Tx.

Devido ao fato do microcontrolador não possuir suporte para a comunicação USB e o computador não possuir portas seriais, foi necessário utilizar um conversor para transformar a informação USB para o protocolo de comunicação serial UART, que é a utilizada pelo microcontrolador. Foi utilizado o dispositivo FTDI232, um conversor USB/TTL que compatibiliza a comunicação.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Circuito com AD633 e circuito de *offset*.

O esquemático da simulação dos circuitos analógicos é apresentado na Figura 3. Com o circuito pode-se amplificar o sinal em uma faixa de 0 V a 0,66 V, lembrando que existe um fator de 0,1 (divisão por 10) próprio do AD633 multiplicando juntamente com o sinal $V_{amplitude}$. Esse fator pode ser facilmente resolvido com a aplicação de um ganho de

10 no circuito. Já no ajuste de *offset* o circuito possibilita trabalho em uma faixa de -13,2 V à 13,2 V.

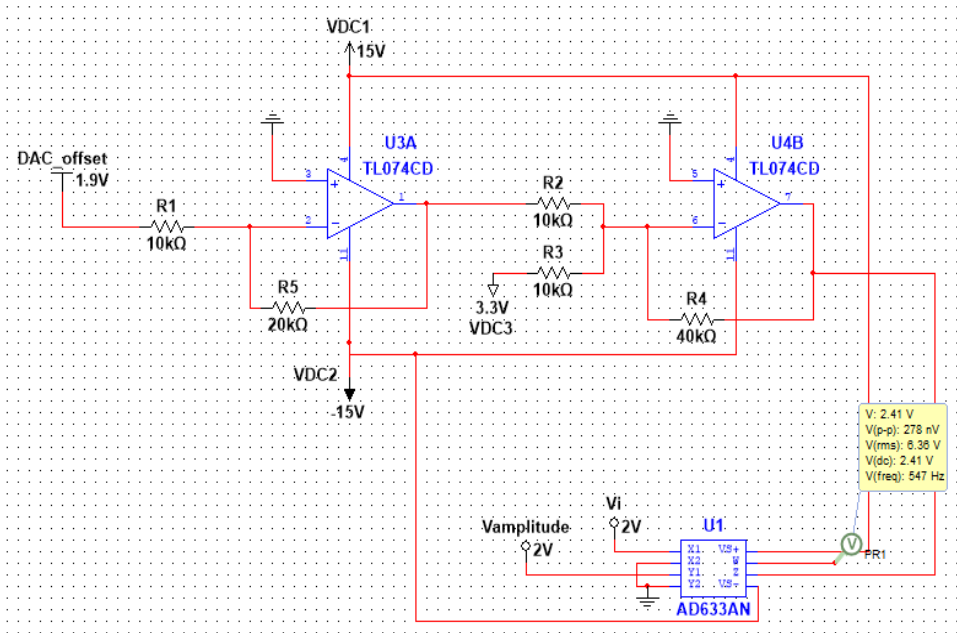


Figura 3 - Circuito com AD633 e circuito de offset.

Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 Interface para PC.

A interface desenvolvida é mostrada na Figura 4. O usuário deve inicialmente informar em qual porta do computador o circuito está conectado e em seguida digitar os valores de amplitude e *offset*.

A interface foi criada inicialmente como uma forma de testar os parâmetros do estágio de saída e posteriormente pode ser alterada para um gerador completo.

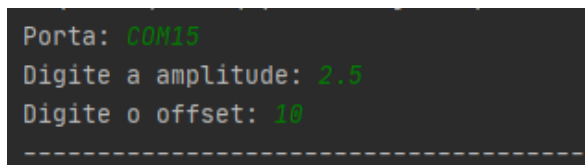


Figura 4 - Interface para PC.

Fonte: Autoria própria (2020).

É importante ressaltar que a alimentação do AD633 é a limitação do sinal de saída, ou seja, pode haver saturação do sinal caso sejam selecionados valores de amplitude e/ou *offset* que ultrapassem as limitações do circuito.

3.3 Funcionamento dos DACs.

Foram realizadas medições para verificar o funcionamento e precisão dos conversores MCP4725. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 1.

Calculado	Medido
0,000	0,001
0,125	0,122
0,130	0,128
0,750	0,749
1,340	1,338
2,000	2,000
2,900	2,900
3,300	3,300

Tabela 1 - Medições módulo DAC MCP4725.

Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se observar que os resultados obtidos são muito próximos ao esperado, porém, apresentam erro na terceira casa decimal. Existem alguns erros relacionados a precisão dos DAC, como o erro de *offset*, erro de fundo de escala e a própria resolução do dispositivo. Entretanto, a causa do erro nesse caso é o instrumento de medição utilizado, que se mostrou com casas decimais insuficientes para realizar medições de variações tão pequenas de tensão.

3.4 Circuito montado em protoboard.

O circuito montado em protoboard contendo o conversor USB/TTL FTDI232, microcontrolador e DACs pode ser visto na Figura 5. Tanto a comunicação entre microcontrolador e computador quanto a comunicação entre microcontrolador com os DACs funciona de maneira muito estável, não foi detectado perda de informação e sem nenhum tipo de mal funcionamento.

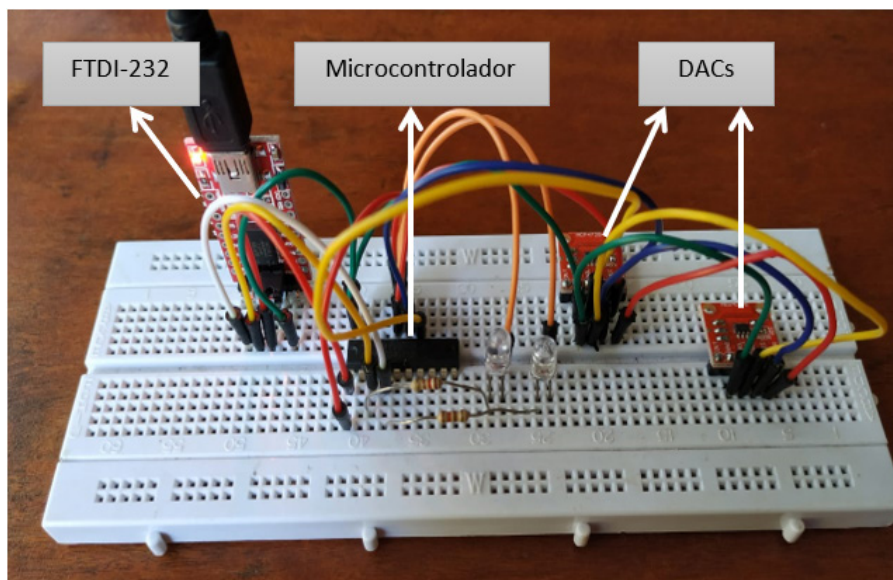


Figura 5 - Circuito montado em protoboard.

Fonte: Autoria própria (2020).

4 | CONCLUSÕES

Neste artigo foi abordado o desenvolvimento de um estágio de saída de um gerador de ondas arbitrárias de baixo custo e de *hardware* aberto. Além disso o estágio possui controle digital, tornando-o mais preciso.

Conclui-se que as etapas realizadas até o momento apresentam resposta satisfatória e estão dentro do escopo estabelecido inicialmente. A comunicação da interface com o microcontrolador, assim como a do microcontrolador com os conversores DAC é muito estável e robusta, sendo assim apropriada para o uso.

Este trabalho se mostrou muito valioso para a formação acadêmica pois tornou possível a aplicação de diversos conhecimentos aprendidos durante a graduação e incentivou a busca dos conhecimentos que ainda faltavam para a realização do projeto.

REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES. **Low Cost Analog Multiplier AD633**, 2015. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD633.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

BRAGA, N. C. **Conheça o Barramento I2C**. Instituto NBC, [s.d.]. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/microcontrolador/143-tecnologia/12085-conheca-o-barramento-i2c-mic098>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MICROCHIP. **12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in STO-23-6**, 2009.
Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

REICHERT, A.; MORETO, R. F. **Desenvolvimento de um gerador de ondas arbitrárias utilizando a técnica de síntese digital direta**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

SANTOS, J. I. D.; LAMPA, P. H. D. M. **Desenvolvimento de um gerador de ondas arbitrárias utilizando a técnica de síntese digital direta e com recursos de modulação**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

DESENVOLVIMENTO DE PLACA DE AQUISIÇÃO E ELETRODOS SECOS EM ELETROMIOGRAFIA

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 29/12/2020

Luiz Augusto Garonce Ferreira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/2597885270943159>

Felipe Walter Dafico Pfrimer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6926615137451062>

Alberto Yoshihiro Nakano

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7663994105896731>

RESUMO: Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de aquisição de sinal eletromiográfico (EMG), utilizando eletrodos secos. Para isso, uma placa de aquisição foi projetada para identificar os sinais bioelétricos gerados por atividade muscular. A placa foi construída com 4 camadas (*layers*), para redução de ruídos gerados por interferência eletromagnética (*Electromagnetic interference* ou EMI). Os eletrodos foram feitos seguindo procedimentos de fabricação de placas de circuito impresso (PCI), com o diferencial de serem cobertos por uma fina camada de ouro, o que possibilitou obter baixa oxidação, elevada condutividade elétrica e propriedade antialérgica. Constatou-se diagramas de Bode semelhantes tanto na simulação, quanto no modelo teórico,

assim como nos resultados práticos do sistema. Espera-se que futuramente este projeto possa ser aplicado em próteses mecânicas, em estudos acadêmicos e em produtos da área de saúde.

PALAVRAS-CHAVE: EMG. Eletromiografia. Eletrodo de superfície.

DEVELOPMENT OF ACQUISITION PLATE AND DRY ELECTRODES ELECTROMYOGRAPHY

ABSTRACT: The project describes the development of the electromyography signal acquisition system (EMG), using dry electrodes and a signal acquisition plate, aimed at medicine, academic studies and the development of robotic prostheses. Thus, an EMG signal acquisition plate was designed to identify the bioelectric signals generated by the muscle. The capture board was designed with 4 layers, to reduce noise generated by electromagnetic interference (*Electromagnetic interference* or EMI). The plate containing the electrodes was built following the same principle as standard circuit boards, with the difference of being covered by a thin layer of gold, which made it possible to obtain a low oxidation point, antiallergic electrodes and high electrical conductivity. Similar bode graphs were found both in the simulation and in the theoretical model, as well as in the practical results. Therefore, the project will enable the development of equipment to attend robotic prostheses and academic studies, using dry electrodes manufactured on printed circuit boards.

KEYWORDS: EMG. Electromyography. Dry electrodes.

INTRODUÇÃO

O sistema muscular humano possui numerosas fibras, que se contraem ou estendem devido aos comandos dos neurônios motores (OLIVEIRA, 2012). Com o comando, as miofibrilas, pequenas partes pertencentes às fibras musculares, recebem os estímulos do cérebro, possibilitando trocas iônicas entre os meios intra e extracelular. Como consequência, existe a geração dos potenciais de membrana, que são os sinais bioelétricos (ou eletromiográficos - EMG) que podem ser captados por eletrodos de superfície.

Os sinais EMG gerados nas células são na ordem de 10^{-6} a 10^{-3} V, possuem característica aleatória com espectro entre 6 e 500 Hz (OLIVEIRA, 2012). Dessa forma, a posição de aquisição dos eletrodos ocorrerá na parte central do músculo, para se obter a maior quantidade de fibras musculares e consequentemente maior potencial bioelétrico.

Este projeto foi motivado pela necessidade da construção de um equipamento que utiliza eletrodos secos (não descartáveis) para a captação de sinais musculares. Tais eletrodos são melhores para equipamentos de uso pessoal, tais como próteses, pois o usuário precisará fazer apenas a higienização dos contatos toda vez que for utilizar. Além disso, os eletrodos desenvolvidos podem ser antialérgicos.

Foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso: uma para a captação, que apresenta quatro camadas (*layers*), *buffers*, um amplificador diferencial e um amplificador não inversor com filtros para uma faixa adequada de aquisição de sinal EMG; e outra placa contendo os eletrodos secos com uma fina camada de ouro.

MATERIAIS E MÉTODOS

Assim como mencionado na introdução, o projeto foi estruturado para ser constituído em duas placas: i) a de captação contendo um amplificador de instrumentação; e ii) a placa dos eletrodos secos. As duas foram desenvolvidas através do o *software* EDA (*Electronic Design Automation*) *Kicad*, que é distribuído gratuitamente (*open source*). A Figura 1 apresenta o diagrama simplificado do conjunto para aquisição do sinal EMG.

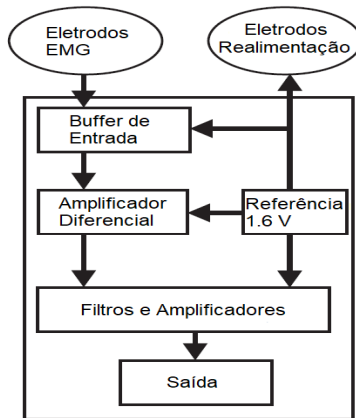


Figura 1 – Diagrama de blocos do conjunto.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2012)

A placa de captação foi projetada para garantir a coleta do sinal EMG e sua visualização em um osciloscópio. O principal elemento desse tipo de equipamento é o amplificador de instrumentação (INA), que possui entrada diferencial, ideal para coleta de sinais bioelétricos.

Para escolha do INA levou-se em consideração cinco quesitos: i) A impedância de entrada; ii) encapsulamento; iii) faixa de tensão de operação; iv) corrente quiescente e v) baixo ruído diferencial. No mercado internacional, foi possível encontrar diversos amplificadores que atendiam total ou parcialmente os requisitos listados e, após uma análise aprofundada, foi escolhido o *chip* INA126 produzido pela *Texas Instruments* (TI) (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). Este INA satisfazia todas as necessidades do projeto.

Além disso, a placa de aquisição foi projetada com quatro camadas para reduzir ruídos de Interferência Eletromagnética (*Electromagnetic interference* ou EMI) (OLIVEIRA, 2012). Além disso, contém o amplificador diferencial escolhido, dois buffers de entrada, filtro passa altas, um amplificador não inversor, filtro passa baixas e por fim um buffer de saída.

Para sua confecção, foram utilizados componentes de montagem em superfície (*Surface Mount Device* ou SMD) para que a placa tivesse um tamanho reduzido (5,8 cm x 2,7 cm, aproximadamente).

A alimentação é de 6 V dada por um conector do tipo pino. A placa contém um regulador monolítico MCP1700 de 3,3 V que alimenta todos os amplificadores operacionais OPA2335 (BURR BROWN PRODUCTS, 2003), OPA335 (BURR BROWN PRODUCTS, 2003), o de instrumentação INA126.

Foi utilizada a referência de tensão ADP1714 (ANALOG DEVICES, 2008) que

fornece um sinal estável de 1,6 V. A Figura 2 mostra o circuito de regulação e o de referência de 1,6 V. Na Figura 3, encontra-se o circuito de aquisição de sinal EMG.

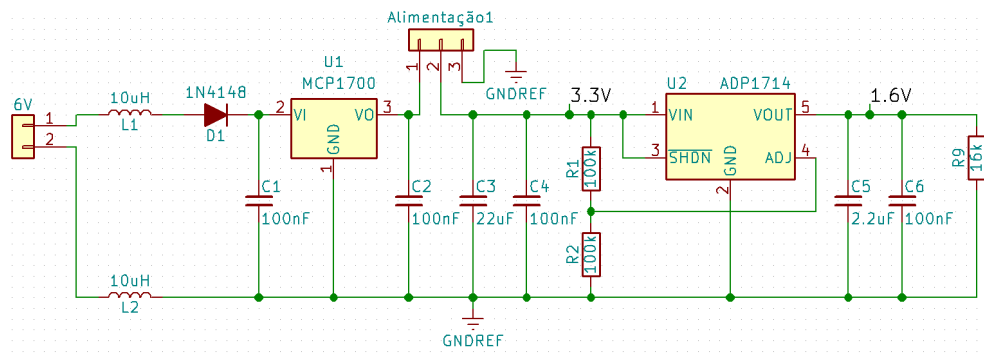


Figura 2 – Fonte de alimentação.

Fonte: Autoria Própria (2020)

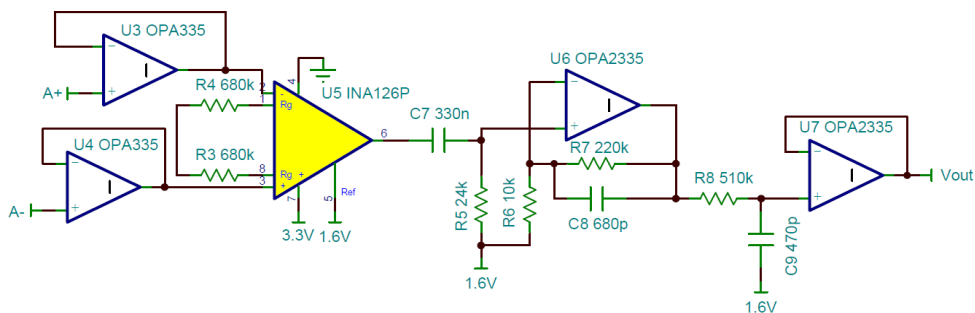


Figura 3 – Circuito de aquisição de sinal EMG.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Na eletromiografia de superfície é recomendado impedância de entrada de no mínimo 100 M Ω (OLIVEIRA, 2012). Dessa maneira, buffers de entrada (U3 e U4) são fundamentais para isolar o circuito de aquisição dos eletrodos (A+ e A-), possibilitando a obtenção de sinais com o mínimo ruído possível, independente das características da pele.

Em seguida, os sinais passam pelo amplificador diferencial (U5) cujo ganho é ajustado por dois resistores em série de 680 k Ω para 5 V/V. Na sequência, o sinal amplificado passa por um filtro passivo passa altas (C7 e R5) configurado com uma frequência de corte de 20 Hz.

Logo depois, o sinal sofre uma amplificação não-inversora com um ganho ajustado, pelos resistores de 220 k Ω e 10 k Ω , em 23 V/V. Dessa forma, o ganho total é de 115 V/V

ou 41,21 dB.

Posteriormente, um filtro passivo passa baixa com uma frequência de corte de aproximadamente 530 Hz foi projetado, provido pelo resistor de 510 k Ω e o capacitor 470 pF. Como consequência, o sinal resultante fica restrito numa faixa de 20 a 530 Hz, região de maior incidência de estímulos musculares (OLIVEIRA, 2012). Ao final do circuito, também existe um seguidor de tensão, proporcionando baixa impedância de saída.

Os eletrodos foram projetados em uma placa de circuito impresso. Dessa forma, foi feito um desenho contendo 12 contatos quadrados, que puderam ser destacados da placa resultante. A placa foi fabricada em uma empresa especializada, o que possibilitou a deposição de ouro sobre os contatos.

O processo de deposição de ouro utilizado é conhecido por ouro de imersão de níquel eletrolítico e restrição de certas substâncias perigosas (*Electroless Nickel Immersion Gold and Restriction of Certain Hazardous Substances* ou *ENIG ROHS*). Tal processo consiste em depositar níquel na superfície do cobre catalisado por paládio, para em seguida o ouro aderir às áreas niqueladas (QUINTERO, 2020).

Os eletrodos foram destacados e lixados conforme mostra a figura 4. Note que existem três eletrodos menores e três maiores instalados em uma estrutura tridimensional para facilitar a colocação dos mesmos sobre a pele. Tal configuração foi feita para estudar diferentes disposições geométricas de aquisição diferencial. No entanto, testes em humanos não foram feitos, pois seria necessário submeter o projeto a um conselho de ética.



Figura 4 – Fixação dos eletrodos no suporte plástico com o cabo de conexão.

Fonte: Autoria Própria (2020)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar o projeto, foram realizados testes para verificar se ganho e espectro em frequência do circuito são condizentes com valores teóricos e simulados. Desta forma,

foi necessário montar um circuito de teste que fornecesse um sinal diferencial com as características de um sinal EMG entre os terminais A+ e A- da figura 3. A Figura 5 apresenta o circuito de teste, onde VG1 é um gerador de sinais. Note que o circuito gera dois sinais semelhantes, entre os pontos A+ e A-, defasados de 180° entre si, com referência em 1,6 V.

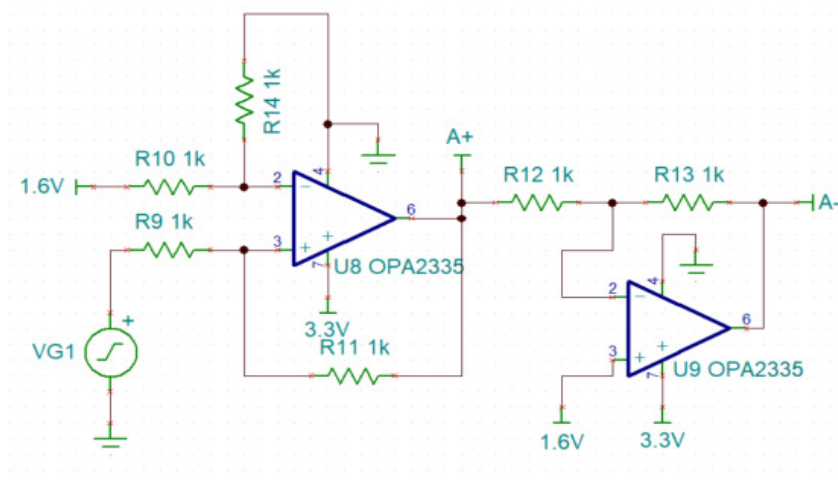


Figura 5 – Circuito de teste.

Fonte: Autoria Própria (2020)

O diagrama de bode do circuito de aquisição do sinal EMG está representado na figura 6, onde são apresentados os resultados práticos (vermelho/quadrado), simulação do circuito (preto/triângulo) e teórico (curva azul/losango). A simulação foi realizada no software TINA (TINA, 2020), em sua versão gratuita. A curva teórica foi obtida através da análise do circuito de aquisição (figura 3), onde foi obtida a seguinte função de transferência:

$$T(s) = \left(\frac{21109,71 s^2 + 3245487243 s}{s^3 + 10982,63 s^2 + 29257615,41 s + 3520998718} \right) \quad (1)$$

É possível verificar que as três curvas são muito próximas, validando o circuito para a captação de sinais com a característica do sinal EMG. Dessa forma, conclui-se que o circuito foi projetado e construído de acordo com as especificações pretendidas. Espera-se que novos testes sejam feitos para validar o circuito através de testes em seres humanos.

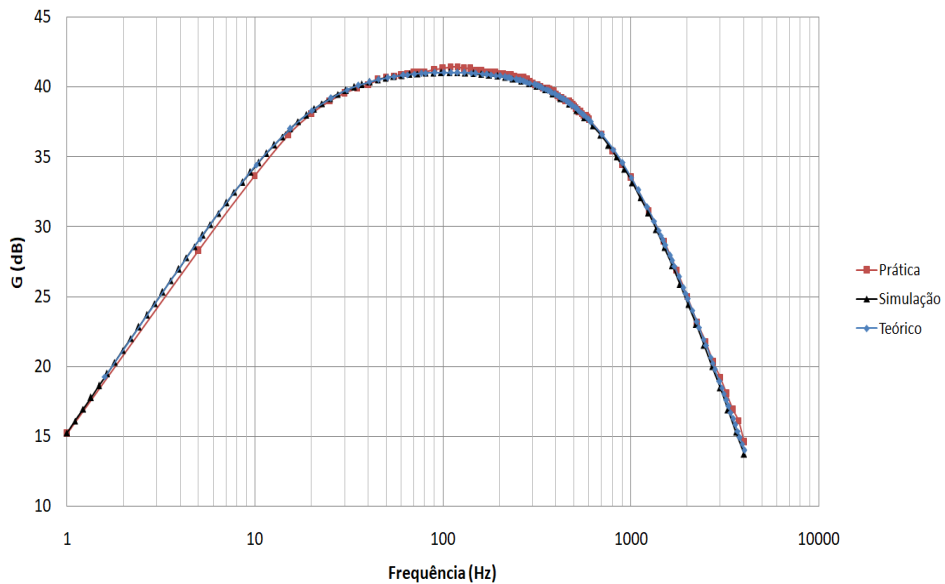


Figura 6 – Gráfico de Bode.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Com o desenvolvimento deste trabalho, espera-se que futuramente haja uma melhor adaptação ao uso de próteses, aumentando consideravelmente o conforto das pessoas no seu dia a dia. Adicionalmente, estima-se que o trabalho desenvolvido possa ser utilizado com o modelo atual de eletrodo para aplicações na robótica.

CONCLUSÃO

Este trabalho contemplou o desenvolvimento de um conjunto contendo eletrodos secos e placa de aquisição de sinal, motivado pela facilidade de aplicação do eletrodo em equipamentos que precisam ficar diretamente conectados à pele, bem como a forma de fabricação do eletrodo. O projeto funcionou como o esperado em relação ao modelo desenhado no software TINA (TINA, 2020) e com os dados teóricos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPQ pela bolsa de Iniciação científica, que me permitiu aprofundar meus conhecimentos na área do meu curso de Engenharia Eletrônica. A experiência e o aprendizado diários tornaram-me um aluno e profissional melhor.

REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES, **ADP 1712, ADP 1713, ADP 1714**. Norwood: Analog Devices Incorporated, 2008. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP1712_1713_1714.pdf>. Acesso em: 06 de agosto de 2020.

BURR BROWN PRODUCTS. **OPA 2335 e OPA335**. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2003. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2335.pdf>>. Acesso em: 06 agosto. 2020.

OLIVEIRA, Frederico Amaral de. **Sensor de Eletromiografia sem fio a seco com acelerômetro triaxial integrado**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2012.

QUINTERO, Eulises. **ENIG VS OSP VS HASL: Which PCB finish for manufacturing**. TITOMA Design For Manufacturing Asia, 2020. Disponível em: <<https://titoma.com/blog/pcb-surface-finish-enig-hasl-osp-isn-iag>>Acesso em: 18 de agosto de 2020.

TEXAS INSTRUMENTS, **INA126 MicroPower Instrumentation Amplifier Single and Dual Versions**. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2015. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina126.pdf>>. Acesso em: 06 de agosto de 2020.

TINA. **Tina**. 2020. Disponível em: <<https://www.tina.com/pt/>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

CAPÍTULO 14

PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE UM CURSO DE OPERADOR DE USINAS TERMELÉTRICAS ARTICULADO COM EMPRESAS DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 30/12/2020

Marcel Ribeiro Mendonça

Instituto Federal do Ceará
Campus Avançado Pecém
Caucaia – CE

<http://lattes.cnpq.br/8634867571107555>

Marcília Maria Soares Barbosa Macedo

Instituto Federal do Ceará
Campus Caucaia
Caucaia – CE

<http://lattes.cnpq.br/9694166021609229>

RESUMO: Este trabalho apresenta uma síntese da metodologia adotada para planejamento e execução de um curso de formação de Operadores de Usinas Termelétricas. No trabalho, é descrito o percurso metodológico para elaboração do projeto pedagógico do curso, bem como de sua matriz curricular, ambos desenvolvidos com a participação direta de empresas administradoras de usinas termelétricas instaladas na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém. Também são apresentados aspectos práticos sobre a execução do curso, como foi a participação dos profissionais das empresas envolvidas durante o desenvolvimento do projeto, por meio de atividades curriculares, palestras e visitas técnicas. Por fim, são avaliados e comparados alguns indicadores de permanência e êxito dos ingressantes no curso, bem como são apresentados os dados de empregabilidade

dos concludentes, com ênfase nas empresas do segmento em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Usinas Termelétricas. Qualificação Profissional. Extensão.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A TRAINING COURSE FOR THERMAL POWER PLANTS OPERATORS IN ASSOCIATION WITH COMPANIES OF PECÉM INDUSTRIAL AND PORT COMPLEX

ABSTRACT: This paper presents an overview of the methodology adopted for planning and execution of an operators for Thermal Power Plants training course. In the paper, the methodologies to formulate the pedagogical project and the curriculum of the course are described. The course was developed in association with companies that manage thermoelectric plants installed in Pecém Industrial and Port Complex. Practical aspects of the course execution will also be presented, such as the participation of professionals from the companies involved during the course's development, through curricular activities, lectures and technical visits. Finally, the course completion rates of the graduates of this course will be evaluated, when compared to the graduates of the other courses, as well as the employability data of the graduates, with emphasis on companies in the segment under study.

KEYWORDS: Thermoelectric power plants. Continuing Education. Extension.

1 | INTRODUÇÃO

O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), na atualidade, constitui-se como um dos grandes vetores de desenvolvimento dos segmentos industrial e de logística do Estado do Ceará. Além do Porto do Pecém, o complexo conta com indústrias de segmentos como de movimentação de cargas, geração de energia elétrica, fabricação de cimento, pás para turbinas eólicas, louças cerâmicas, tubulações de aço, entre outras. Além disso, possui a única siderúrgica integrada em operação nas regiões norte-nordeste do Brasil, e a única Zona de Processamento de Exportação (ZPE) em funcionamento e com indústrias no país. O complexo ocupa uma área total de 13.337 hectares entre os municípios de Caucaia e de São Gonçalo do Amarante, na região metropolitana de Fortaleza, e no total, já recebeu investimentos da ordem de R\$ 28,3 bilhões (AECIPP, 2020).

Atualmente, estima-se que cerca de 61 mil empregos diretos e indiretos sejam gerados pelas empresas do CIPP. Contudo, a pouca qualificação da mão de obra local tradicionalmente se apresenta como um dos entraves para o crescimento do setor industrial (CHIARA e GAVRAS, 2019) (GERBELLI, 2020). É comum que empresas, por livre iniciativa, fomentem o surgimento de programas de qualificação profissional, em especial aqueles que utilizam, para isso, o instituto da Lei de Aprendizagem.

A ausência de mão de obra qualificada afeta não somente os níveis de operação e manutenção, mas também os níveis de coordenação, gerência e alta gestão. Com isso, frequentemente observa-se que as empresas do CIPP fazem a captação de mão de obra em outros estados do país.

Desta forma, este trabalho irá descrever uma proposta de metodologia de planejamento e execução, adotada para a concepção de um curso de formação de Operadores de Usinas Termelétricas, que qualificou profissionais com formação técnica de nível médio, ou superior em Engenharia, mas sem experiência no setor. Com isso, espera-se que as empresas priorizem a contratação de profissionais oriundos do curso introduzindo, desta forma, a mão de obra local em funções onde até então esta não estava inserida.

2 | JUSTIFICATIVA

A instalação de novos empreendimentos industriais, frequentemente gera, nas comunidades residentes no entorno destes empreendimentos, uma expectativa de contratação e aproveitamento da mão de obra local. Nos últimos 20 anos, diversos empreendimentos foram implantados no CIPP. No entanto, o nível de especificidade de algumas profissões, em especial as dos setores siderúrgico e de geração termelétrica, frustraram parcialmente a população, que ficou muitas vezes limitada a ocupar atividades de baixa complexidade, de demanda sazonal, e consequentemente, com menores salários. Esta situação tende a suscitar conflitos e litígios, que demandam a mediação, ou mesmo a

intervenção, das diversas esferas do poder público (ASSEMBLEIA, 2017).

O segmento de geração de energia elétrica tem especial relevância na economia do CIPP. Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS, 2020), o complexo atualmente possui cinco usinas de geração termelétrica, listadas na Tabela 1. Juntas, estas empresas correspondem a uma potência instalada de 1,853 GW, com estimativa de que cerca de 5 mil empregos diretos e indiretos tenham sido gerados desde sua implantação. Estas usinas utilizam gás (natural ou oriundo de resíduos industriais) ou carvão como combustível. Além delas, o complexo também possui duas fábricas de pás para turbinas eólicas, e tem instalado em suas proximidades um complexo de geração de energia eólica.

Agente	Combustível	Potência Instalada
Porto Pecém Geração de Energia S/A (EDP)	Carvão	720 MW
Pecém II Geração de Energia S/A (ENEVA)	Carvão	365 MW
CSP - Companhia Siderúrgica do Pecém	Resíduos Industriais	218 MW
Central Geradora Termelétrica Fortaleza S/A	Gás	327 MW
Petróleo Brasileiro S/A	Gás	223 MW
TOTAL		1.853 MW

Tabela 1 – Empreendimentos de geração termelétrica ativos no CIPP

Fonte: ONS (2020)

Para atuar no setor, é comum que estas empresas exijam formação mínima em nível técnico, para os setores de operação e manutenção. Para os setores de coordenação, supervisão, análise e gestão, frequentemente é exigida a formação em Engenharia. Grande parte das instituições de ensino, de ambos os níveis, não proporciona formação que atenda às necessidades do setor, já que frequentemente é exigido dos profissionais uma formação multidisciplinar com foco em geração termelétrica, que envolve áreas como combustíveis, combustão, termodinâmica, sistemas elétricos, tratamento de água, meio ambiente, automação, instrumentação, entre outros.

De acordo com o Catálogo Brasileiro de Ocupações (CBO), o Operador de Usina Termelétrica é o um profissional que opera instalações de sistemas elétricos, mecânicos, hidráulicos e de instrumentação, e controla grandezas eletromecânicas inerentes ao processo. Também é responsável por manobrar equipamentos de manutenção, inspecionar equipamentos, elaborar relatórios técnicos, e seguir normas e procedimentos ocupacionais de saúde e segurança. Para atuar no segmento, também se recomenda frequentar curso de qualificação com em torno de 400 horas aula.

3 | METODOLOGIA

As instituições de Educação Profissional e Tecnológica (EPT), nos últimos anos, tem desenvolvido organizações curriculares cada vez mais alinhadas ao setor produtivo. O currículo, neste contexto, acaba por se configurar como o produto das diversas atividades de aprendizagem e experiências vivenciadas pelo estudante, inclusive por meio de atividades não formais. Esta modernização tem se fundamentado, principalmente, nos conceitos de formação por competências, na possibilidade de flexibilização do currículo, e por fim, nas próprias características e finalidades da EPT (BARBOSA *et al*, 2001).

A metodologia adotada para o planejamento e execução do curso tomou como premissa a necessidade de diálogo constante entre as instituições. Em projetos desta natureza, é importante que os conhecimentos e habilidades de cada componente das equipes seja potencializado nas ações propostas. Além disso, é importante destacar que frequentemente são observados elevados indicadores de evasão e retenção em muitos cursos desta natureza, e de que a metodologia proposta deverá buscar a redução deste indicadores, seja por meio de um processo seletivo mais criterioso em relação à formação prévia do estudante, ou mesmo por meio de ações motivadoras ao longo da execução do curso.

A Figura 1 resume a proposta de metodologia adotada para execução do projeto. A metodologia prevê a existência de uma etapa de concepção e fundamentação, realizada continuamente pelo *campus* e de forma anterior ao planejamento prévio do curso; a etapa de planejamento, mais diretamente ligada ao projeto do curso proposto; e a etapa de execução propriamente dita, composta pelo processo seletivo, realização do curso, e processo seletivo posterior de concludentes.

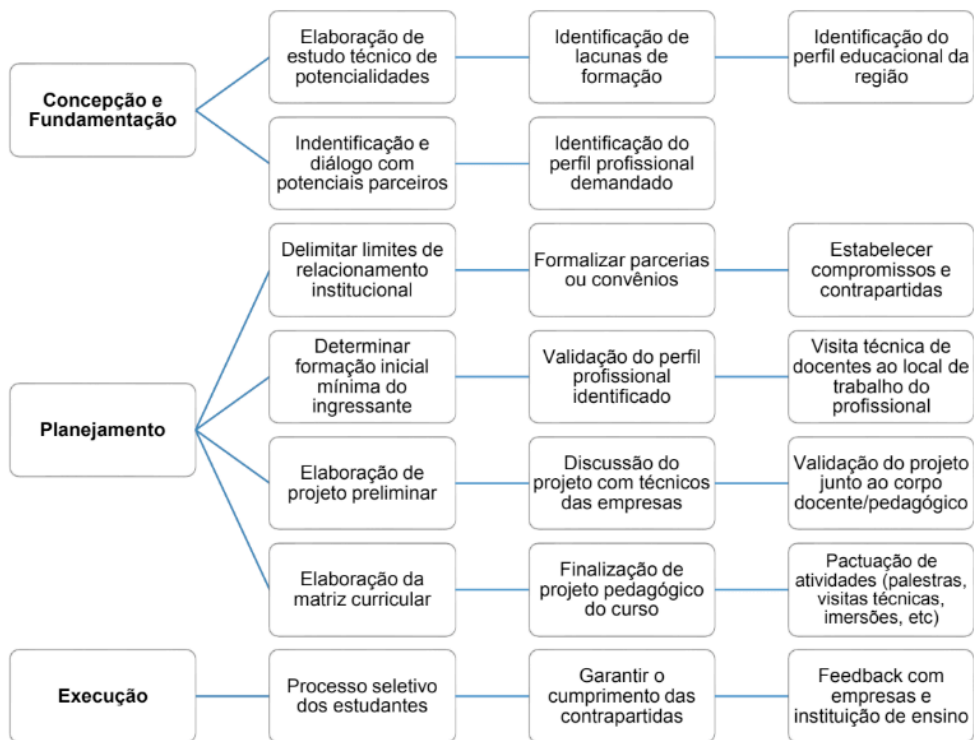


Figura 1 – Proposta de metodologia adotada para execução do projeto

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Concepção e fundamentação

Desde a implantação do IFCE *campus* avançado Pecém, ações de caracterização e identificação de potencialidades regionais têm sido desenvolvidas, com o intuito de direcionar esforços às reais necessidades da comunidade. Por este motivo, desde 2017, a instituição formulou um estudo de potencialidades para implantação de novos cursos, que analisa as potencialidades socioeconômicas, o mercado de trabalho, o perfil educacional da região e as demandas por qualificação dos residentes e das empresas instaladas (IFCE, 2017).

Por meio do estudo, foi possível identificar setores com a ausência de profissionais qualificados em determinadas ocupações, o perfil de educação formal da população, e o perfil de oferta de educação técnica e superior na região. Além disso, a elaboração do estudo possibilitou um diálogo inicial com potenciais parceiros. Neste contexto, foi identificado que o setor de geração de energia termelétrica possuía uma demanda recorrente por operadores de usinas termelétricas, que devido à inexistência de formação na região, buscava profissionais formados em outros estados do país.

3.2 Planejamento

Durante o planejamento do curso, foi importante pactuar os limites de relacionamento institucional entre os parceiros. Nesta etapa é necessário buscar denominadores comuns entre os interesses de cada instituição. No caso deste curso, já existia um convênio formalizado entre as empresas e uma associação representativa destas empresas. Assim, delimitou-se que o interesse das instituições era de realizar uma oferta pública e gratuita do curso de formação, exclusivo para pessoas já qualificadas em nível técnico ou superior em engenharia, preferencialmente residentes nas proximidades do CIPP. Além disso, estabeleceu-se que as empresas parceiras realizariam processos seletivos com os concludentes do curso, para desenvolvimento de estágios supervisionados, ou para contratação dos concludentes para período de experiência.

Posteriormente, foi feita a validação do perfil esperado do egresso, por meio de reuniões com gestores das áreas de recursos humanos, operação e manutenção, e docentes das áreas de química, elétrica, mecânica, qualidade e segurança do IFCE. Além disso, foram identificados os requisitos, competências e habilidades esperadas para os profissionais que seriam formados pelo curso.

Nesta etapa, além das reuniões entre as equipes de gestão, os docentes realizaram uma imersão, durante um dia, nos diversos processos das empresas participantes. Na imersão, foi possível identificar particularidades de como seria a atuação destes profissionais nas usinas, em cada um de seus subprocessos. Posteriormente, os docentes propuseram uma matriz curricular, bem como seus conteúdos programáticos, que foram posteriormente validados em reunião conjunta com os gestores das empresas. Por fim, também foi delimitado o perfil mínimo de formação exigido para os estudantes.

A etapa de planejamento, iniciada na primeira reunião realizada entre as equipes do projeto, e concluída após a abertura oferta pública do curso, durou cerca de três meses.

3.3 Execução

A garantia do perfil de formação mínimo é imprescindível nesta etapa por dois fatores: em primeiro lugar, como o curso ofertado será de curta duração, não há tempo para proporcionar formação em conteúdos básicos ao estudante, portanto, espera-se que o mesmo já detenha algum conhecimento em áreas correlatas ao curso; E em segundo lugar, é necessário adequar a formação mínima solicitada para ingresso no curso à formação mínima solicitada para ingresso nas empresas. Caso este alinhamento não ocorra já no processo seletivo, mesmo que o estudante seja aprovado e conclua o curso, ele não poderá ingressar na empresa, já que muitas vezes estas possuem regramentos próprios de seleção e provimento em vagas exigindo-se, por exemplo, a formação em nível técnico ou superior do estudante.

Também é importante garantir o cumprimento das contrapartidas pactuadas entre ambas as instituições. Desta forma, é fundamental que as empresas cumpram com os

cronogramas das atividades pactuadas, em especial nas palestras e visitas técnicas, que darão ao estudante uma visão prática dos conteúdos ministrados. E, ao mesmo tempo, que o corpo docente desenvolva seu planejamento de atividades alinhado ao pactuado nos projetos pedagógicos. Este acompanhamento pode ser potencializado por meio das reuniões dos conselhos de classe, onde eventuais dificuldades do corpo docente poderão ser socializadas ao longo da execução do curso.

4 | RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta um resumo das disciplinas pactuadas, bem como a distribuição de cargas horárias e atividades que seriam desenvolvidas pelo IFCE e pelas empresas parceiras. Para cada uma das disciplinas, foi estabelecida uma carga horária a ser desenvolvida por alguma das empresas do setor, e o formato desta atividade.

Nome do Módulo/ disciplina	Ementa resumida	Carga Horária IFCE	Carga Horária Empresas	Carga Horária Total	Atividade
Tratamento de Água	Qualidade da água, tecnologias de tratamento de água, desmineralização, geração de vapor em caldeiras, torres de resfriamento, tratamento químico de caldeiras e torres	36	4	40	1 palestra
Combustíveis e Combustão	Principais combustíveis em termelétricas, queimadores, processos de combustão, reações químicas associadas ao processo de combustão, poluentes atmosféricos.	32	8	40	2 palestras
Termodinâmica e Transmissão de Calor	Leis da termodinâmica, transferência de calor (condução, convecção, radiação), aplicações de transferência de calor	36	4	40	1 palestra
Controle de Processos Industriais	Sistemas de controle em processos de geração, nível de alimentação, condensadores, tambores e temperatura	64	16	80	4 palestras
Máquinas e Equipamentos	Princípios de máquinas de fluxo, curvas características, equações fundamentais, bombas, sistemas de bombeamento, ventiladores, turbinas hidráulicas	56	4	60	1 visita técnica
Automação Industrial	Sensores e atuadores industriais, controladores lógicos programáveis, sistemas de controle e supervisão, aplicações de automação em geração termelétrica	32	8	40	2 palestras
Geração Termelétrica	Geração termelétrica a gás natural e carvão, equipamentos e etapas, tipos de turbinas e geradores, subestações	36	4	40	1 visita técnica
Controle Ambiental	Aspectos legais, emissões atmosféricas, efluentes e resíduos, geração, tratamento e disposição de resíduos sólidos	16	4	20	1 palestra
Sistemas Elétricos	Organização do sistema elétrico brasileiro, sistema interligado nacional, sistemas elétricos de potência (geração, transmissão e distribuição)	36	4	40	1 visita técnica

TOTAL	344	56	400	14 atividades
--------------	------------	-----------	------------	--------------------------

Tabela 2 – Matriz curricular do curso proposto

Fonte: Elaborado pelo autor

Após as etapas de planejamento, a matriz curricular e o conteúdo programático do curso foram propostos e validados junto às empresas e à instituição de ensino. A matriz curricular proporciona, desta forma, o contato com um conjunto de conteúdos e experiências que farão com que o estudante possa iniciar suas atividades nas empresas de forma mais assertiva.

A proposta de trabalho adotada foi a de oferta de um curso com carga horária total de 400 horas, ministrado de segunda-feira a sexta-feira das 13:30 às 17:45 por um período de cinco meses, iniciados a partir de agosto de 2019. Do total, 344 horas foram ministradas por docentes do IFCE, e 56 horas por técnicos das empresas, que desenvolveram estas horas de aula por meio de palestras sobre a aplicação daquela disciplina à vivência do profissional, e visitas técnicas às empresas no primeiro, terceiro e no quinto mês de aulas.

Em cada componente curricular foi desenvolvido, no mínimo, uma palestra técnica, ministrada por profissionais que atuem no setor da empresa correspondente à disciplina, como forma de apresentar uma perspectiva de aplicação prática da disciplina. Nas visitas técnicas, os estudantes faziam uma imersão em setores específicos. Estas, normalmente aconteciam no mesmo dia em que uma das palestras, de tal maneira que os estudantes permaneciam durante todo o dia na empresa.

A etapa de seleção do curso contou com pouco mais de 200 inscritos. Para participação no processo seletivo, foi estabelecido como requisito mínimo de escolaridade o ensino médio completo, e curso de formação técnica ou superior nas áreas de eletrotécnica, eletromecânica, automação industrial, eletroeletrônica, metalurgia, química, petroquímica ou áreas afins (em andamento ou concluído).

A Figura 2 apresenta um comparativo entre o percentual de estudantes concludentes, evadidos e em fluxo, em três tipos de amostras: na primeira, é apresentada somente a situação final dos 30 estudantes do curso de Operador de Usinas Termelétricas. Já a segunda e a terceira apresentam a situação final nos cursos de qualificação profissional no IFCE campus Avançado Pecém, e em todos os cursos de qualificação profissional do IFCE, respectivamente com um total de 687 e 8.507 estudantes, segundo dados da Plataforma Nilo Peçanha 2020 (ano base 2019).

Pela análise dos gráficos, é possível constatar que, enquanto a média de concludentes no *campus* e no IFCE é de respectivamente 54,1% e 59,9%, a média de concludentes no curso de Operador de Usinas Termelétricas foi de 83,3%. Além disso, o curso teve 10% de seus estudantes evadidos, número bastante inferior ao observado na média dos cursos de

qualificação profissional do *campus*, que estava em 43,7%.

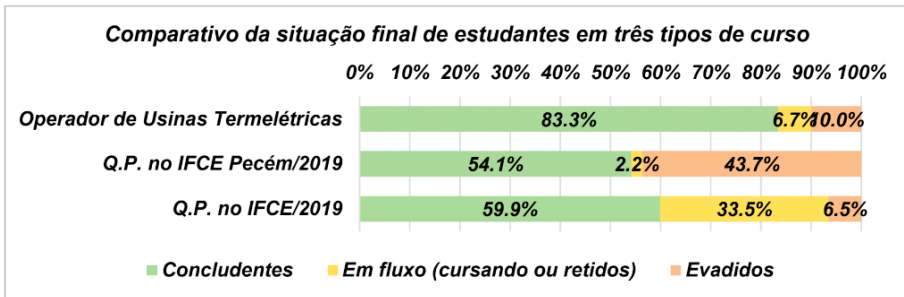


Figura 2 – Comparação entre o percentual de estudantes concludentes, evadidos e em fluxo

Fonte: Elaborado pelo Autor

Durante a execução do curso, foi possível observar que os estudantes se mantiveram bastante motivados, em especial devido à real possibilidade de ingresso na carreira em uma das empresas do CIPP. Além disso, por ser uma oferta praticamente única na região nordeste, muitos também tinham a expectativa de receber oportunidades de emprego em outras localidades do país. Logo no encerramento do curso, 12 estudantes foram contratados por empresas, e os demais foram cadastrados para oportunidades futuras. Também foi possível observar que os três estudantes que evadiram ao longo do curso, o fizeram por incompatibilidade no horário das aulas e do trabalho.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por propostas curriculares cada vez mais alinhadas às demandas latentes do setor produtivo tem se constituído como um dos grandes desafios dos sistemas educacionais, e em especial nas instituições especializadas na oferta de curso de Educação Profissional e Tecnológica. Como foi possível observar, o curso apresentou índices de permanência e êxito bastante superiores à média dos cursos oferecidos quando comparado aos cursos ofertados no *campus* e em todos os demais *campi* do IFCE.

A metodologia apresentada neste trabalho pode auxiliar no desenvolvimento de propostas curriculares mais assertivas em relação a estas demandas, e mais atrativas ao corpo discente, contribuindo com a melhoria dos indicadores de permanência e êxito não somente neste tipo de curso, mas também em cursos de nível técnico, e em especial na educação superior. Contudo, apesar de a metodologia ter apresentado números positivos nos indicadores de permanência e êxito estudantil, ainda observou-se que um pequeno número de estudantes não conseguiu concluir o curso. Esta situação ocorreu tanto devido à reprovação em um ou mais módulos de disciplinas (no caso de estudantes retidos), quanto

por desistência voluntária ocorrida por motivos de horários de trabalho incompatíveis com o horário do curso.

Também é importante destacar que este tipo de trabalho integrado entre empresas e instituição de ensino, pode induzir a criação de outros tipos de ações, como programas de estágio, projetos de pesquisa e extensão, prestação de serviços tecnológicos, entre outros. Sabe-se que este tipo de ação também acaba melhorando, ainda que indiretamente, os indicadores de permanência e êxito em todos os cursos da unidade. Assim, a criação de canais de diálogo permanente com empresas e suas instituições representativas, observando-se os limites de atuação institucional, a autonomia administrativa e pedagógica das instituições de ensino, e os princípios da administração pública, podem contribuir para que a instituição potencialize suas ofertas formativas, bem como a formação de capital humano.

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se a criação de mecanismos que possibilitem um controle mais adequado de estudantes que potencialmente possam converter-se em evasão ao longo do curso. Além disso, a abertura de diálogo entre a instituição de ensino e as empresas poderão possibilitar que eventuais desistências do curso em virtude de incompatibilidade de horários de trabalho sejam revertidas.

REFERÊNCIAS

AECIPP. **CIPP – A nova ordem industrial e logística do Ceará**. Disponível em: <http://www.aecipp.com.br/pt-br/cipp>. Acesso em: 14 jul. 2020.

ASSEMBLEIA Legislativa do Ceará. Qualificação e mais vagas para cearenses no Pecém são cobradas em audiência. **Portal de Notícias da Assembleia Legislativa do Ceará**, Fortaleza, 10 abr 2017. Últimas Notícias. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/index.php/ultimas-noticias/item/62999-10-04-2017-lf01>. Acesso em: 10 jun 2020.

BARBOSA, Eduardo Fernandes; MARTINS, Rachel Cruz; ROCHA, Marli Ferreira. O planejamento curricular para a Educação Profissional no modelo de competências. **Educação & Tecnologia**, Belo Horizonte, v.6, n.1/2, p.49-59, 2001

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Cenário atual do complexo industrial e portuário do Pecém / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos**, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza-CE: INESP, 2013.

CHIARA, Márcia de; GAVRAS, Douglas. Sem qualificação, parte dos brasileiros não consegue ocupar vagas básicas. **O Estado de São Paulo**. São Paulo-SP: 02 jun 2019. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,sem-qualificacao-parte-dos-brasileiros-nao-consegue-ocupar-vagas-basicas,70002852842>. Acesso em: 10 jul 2020.

GERBELLI, Luiz Guilherme. Falta de mão de obra qualificada afeta metade das indústrias do país. **G1**. Caderno Economia. São Paulo-SP: 11 fev 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/concursos-e-emprego/noticia/2020/02/11/falta-de-mao-de-obra-qualificada-afeta-metade-das-industrias-do-pais.ghtml>. Acesso em: 10 jul 2020

IFCE. **Estudo de Potencialidades para implantação de novos cursos no IFCE Campus Avançado Pecém**. Caucaia-CE: Abril 2017. Disponível em: <https://ifce.edu.br/pecem/campus-pecem/documentos-e-editais-do-campus/documentos-institucionais/estudo-de-potencialidades-06-06-2018.pdf/view>. Acesso em: 10 jul 2020.

ONS. **Mapa Dinâmico do SIN**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 15 jul 2020

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE ANÁLISE DE AZEITES E ÓLEO VEGETAL DE BAIXO CUSTO

Data de aceite: 22/02/2021

Data de submissão: 14/01/2021

Matheus Bogo Polidorio

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Eletrônica
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/3228624456369150>

Alexandre de Sousa Duarte

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia de Bioprocessos
e Biotecnologia
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7820812385104625>

Alberto Yoshihiro Nakano

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Eletrônica
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7663994105896731>

Ricardo Schneider

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Química
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/0680583757403350>

Felipe Walter Dafico Pfrimer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Eletrônica
Toledo – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6926615137451062>

RESUMO: O azeite de oliva extravirgem é considerado hoje um produto de alto valor comercial e nutricional e, a esses fatores, soma-

se a impossibilidade de um consumidor comum detectar possíveis fraudes, fazendo com que esse alimento se torne alvo de adulterações. Atualmente, a detecção dessas fraudes é realizada por métodos de análise laboratoriais demandando tempo e mão de obra especializada. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo para a aquisição e processamento de imagens de óleos/azeites vegetais de maneira rápida sem a violação da embalagem, a fim de mensurar possível adulteração de óleo/azeite. Para validação das técnicas de análise, foram utilizados como amostras, recipientes de óleo de soja de diferentes marcas e lotes, visto que seu valor comercial é inferior ao azeite de oliva. A aquisição das imagens digitais foi realizada com a plataforma de desenvolvimento *Raspberry Pi 3*, uma câmera digital *Pi Camera* e um *software* de captura elaborado em Python. Após o processamento digital, utilizou-se de dois métodos para análise dos dados: *Principal Component Analysis* (PCA) e o *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Como resultado, observou-se que o equipamento desenvolvido é estável e que o PCA e o LDA conseguiram classificar as amostras de óleo.

PALAVRAS-CHAVE: Azeite. Óleo Vegetal. Processamento de imagem. Classificadores. Reconhecimento de padrão.

DEVELOPMENT OF A LOW-COST OLIVE OIL AND VEGETABLE OIL ANALYSIS DEVICE

ABSTRACT: Today, extra virgin olive oil is considered to be a product of high commercial

and nutritional value and the inability of an ordinary consumer to detect possible fraud make this food a target for adulteration. The detection of these frauds is usually carried out by laboratory analysis, demanding time and specialized labor. This work aims to develop a low cost device for the acquisition and processing of images of vegetable oils /olive oils quickly, without the violation of the container, in order to measure possible adulteration of the olive oil with other vegetable oils. To validate the analysis techniques, soybean oil containers of different brands and lots were analyzed. The acquisition of digital images was made with the development platform Raspberry Pi 3 and a Pi Camera, with a capture software elaborated in Python. After the digital processing, PCA and LDA were used to classification. As a result, it was observed that the equipment developed is stable and that the PCA and LDA were able to correctly classify oil samples.

KEYWORDS: Olive oil. Vegetable oil. Image Processing. Classifiers. Pattern recognition.

1 | INTRODUÇÃO

O azeite de oliva extravirgem é considerado hoje um produto de alto valor comercial e nutricional e, a esses fatores, soma-se a impossibilidade de um consumidor comum detectar possíveis fraudes, fazendo com que esse alimento se torne alvo de adulterações. De acordo com Karbasian *et al.* (2015), o azeite de oliva extra virgem, em particular, é muito suscetível a mistura com óleos vegetais mais baratos e de qualidade inferior por causa de seu estado líquido, prática que tem por objetivo aumentar o seu rendimento. A falsificação é um problema que acontece no mundo todo e de acordo com Lipp (2012), os riscos de fraude aumentam com o crescimento da globalização e o aumento na competição de mercado, fazendo com que tanto os azeites produzidos nacionalmente, quanto os importados, possam ser adulterados.

Diversos estudos para controle da qualidade do azeite de oliva podem ser encontrados na literatura, estudos estes que utilizam de métodos como calorimetria de varredura diferencial (VAN WETTEN, A. W. *et al.*, 2015), entre outros. Entretanto, a maioria desses métodos requer equipamentos e instrumentação de alto custo bem como análise laboratorial, ou seja, demanda mão de obra técnica especializada, equipamentos certificados e tempo para apresentação de resultados consistentes. Como solução a estes problemas, técnicas de processamento digital estão sendo aplicadas na análise de alimentos, inclusive de azeites de oliva (GODOY, A. C. *et al.*, 2020) e óleos vegetais (BURCKHARDT, G. M. *et al.*, 2018). A maior parte desses estudos se utiliza das informações contidas nas cores das imagens de amostras em conjunto com algoritmos de reconhecimento de padrão/classificadores.

Alguns métodos de classificação como o *Principal Component Analysis* (PCA) e o *Linear Discriminant Analysis* (LDA) já são utilizados em diferentes aplicações analíticas, inclusive na análise de alimentos (GODOY, A. C. *et al.*, 2020). O PCA é um método de classificação usado na redução de dimensionalidade de um conjunto de dados que

contém um grande número de variáveis correlacionadas entre si, mantendo a variação desse conjunto (THARWAT, 2016) que é realizado através da associação de variáveis ou características do conjunto original de maneira em que a variância entre esses dados seja mantida. Essa combinação resulta nas componentes principais (PC do inglês *Principal Components*), que podem ser visualizadas através de um gráfico de *scores*, ou seja, as PCs em eixos distintos. Já o LDA é um método utilizado na separação de grupos/classes, cujo objetivo é maximizar a separabilidade entre grupos, de maneira a facilitar a classificação dos dados (THARWAT *et al.*, 2018). O LDA assim como o PCA, reduz a dimensionalidade do conjunto de dados, porém tem como objetivo principal separar os dados entre grupos já conhecidos, criando um novo eixo linear e projetando os dados nesse eixo, maximizando a distância entre eles.

Deste modo, neste trabalho será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento de um equipamento de baixo custo de produção, cuja finalidade é realizar uma análise rápida do azeite de oliva/óleo vegetal através de processamento digital de imagens em conjunto com o PCA e o LDA para classificação das amostras.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O princípio básico de funcionamento do dispositivo consiste na aquisição de imagens do espectro visível com uma câmera digital, que posteriormente são processadas na tentativa de se obter informações contidas na cor dessa imagem. Para isso, precisa-se de um dispositivo físico que deve ser sensível ao espectro de energia eletromagnético, que no caso desse trabalho é a faixa visível do espectro. Este dispositivo transdutor é chamado de *charge-coupled device* (CCD) e deve produzir em sua saída um sinal elétrico proporcional ao nível de energia percebido. De acordo com Esquefa *et al.* (2015), esse sinal elétrico analógico produzido na saída do transdutor, é convertido em um sinal digital por meio de um conversor analógico digital (ADC do inglês *Analog to Digital converter*) e processado digitalmente, convertendo o sinal discretizado em uma imagem digital.

Esse sinal digital é gravado numericamente em uma matriz bidimensional (Q) de ordem $N \times M$, em que N representa as linhas e M as colunas (GODOY, A. C. *et al.*, 2018). Ainda de acordo com Godoy *et al.*, cada elemento da matriz, expresso por q_{ij} com $1 \leq i \leq N$, e $1 \leq j \leq M$, é definido como um pixel e assume valores positivos entre 0 e 255 para cada canal de cor. A matriz que representa essa imagem pode ser apresentada através de camadas independentes L_k , com $1 \leq k \leq n$, em que cada camada indica uma matriz do sistema de cor e cada elemento pode ser expresso por I_{ij}^k para cada canal de cor, como pode ser observado na Figura 1. No sistema de cores *Red-Green-Blue* (RGB), faz-se $k = \{1, 2, 3\}$, assim tem-se L_1 para R, L_2 para G e L_3 para B. Existem ainda diversos outros sistemas de cores como alternativas ao RGB como, por exemplo, o *Hue-Saturation-Value* (HSV) e *Gray scale*.

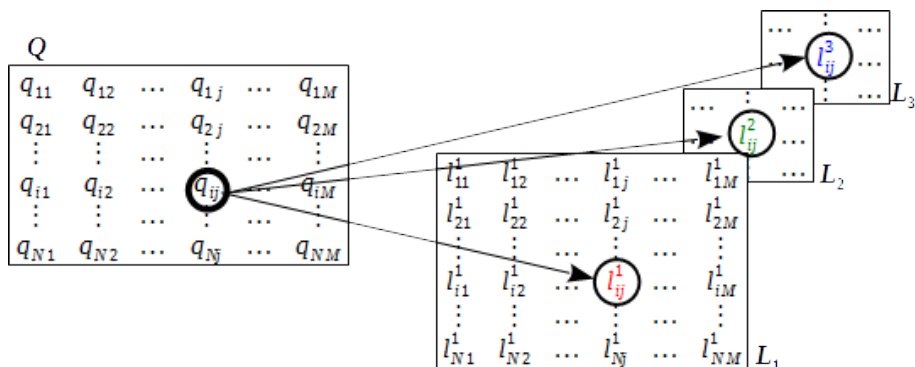


Figura 1: Decomposição da matriz bidimensional(Q), que representa uma imagem digital, em camadas L1 para Red, L2 para Green e L3 para Blue

Fonte: Autoria Própria (2020)

A maioria dos sistemas utilizados na análise de alimentos, a partir do processamento digital de imagens, utiliza-se de sistemas adaptados e com ambiente controlado para a aquisição das imagens, normalmente sendo necessária a utilização de iluminação externa com lâmpadas LED (*light emitter diode*), *webcams*, e *notebooks* para análise (BURCKHARDT, G. M. *et al.*, 2018). O princípio de funcionamento desses sistemas pode ser observado na Figura 2, onde se tem um emissor de luz, uma cubeta com a amostra a ser analisada e a câmera para realizar a aquisição das imagens. No dispositivo que será apresentado neste trabalho, a amostra a ser analisada fica em um ambiente fechado protegida de interferência externa, onde somente a luz proveniente do emissor incide nessa amostra. De acordo com Milanez *et. al* (2015), a aquisição das imagens em um compartimento fechado facilita o controle da luz incidente nas amostras, o que garante qualidade e uniformidade às imagens.

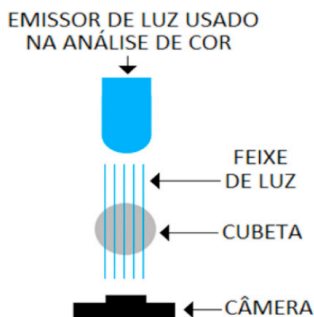


Figura 2: Princípio de funcionamento dos dispositivos

Fonte: Autoria própria (2020)

Nessa mesma direção, o dispositivo foi desenvolvido com um *Raspberry Pi 3B* substituindo o computador pessoal, no qual foi desenvolvido um *software* em Python 2.7 para a captura das imagens, uma *Pi Camera* como câmera digital, com resolução de 3280x2464 pixels posicionada a 2,5 cm da amostra, uma fita de LED de 2 W para iluminação uniforme das amostras, controlada a partir de um controlador de corrente em conjunto com um sensor de luminosidade TSL2561, que se comunica com o *Raspberry* via protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) e apresenta em sua saída o valor convertido em Lux, unidade de intensidade de luz. A estrutura física para o dispositivo foi modelada no *software* Fusion 360® para ser impressa por manufatura aditiva em uma impressora 3D. Para a modelagem, foram levados em considerações alguns aspectos como as medidas de diâmetro e altura dos recipientes de óleo a serem utilizados como amostras, e as posições da câmera, LED e sensor de luminosidade. Após a impressão do dispositivo, foram realizados alguns ajustes nos encaixes e realizada as perfurações necessárias para passar os fios de iluminação e do sensor da parte interna para a parte externa do dispositivo, conectando-os ao *Raspberry* e no controlador de corrente. O dispositivo finalizado onde se insere o produto para análise sem violação do recipiente pode ser observado na Figura 3.

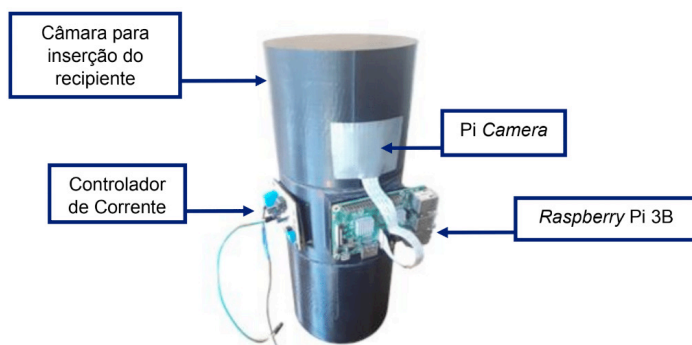


Figura 3: Protótipo para análise de óleo/azeite sem violação do recipiente

Fonte: Autoria própria (2020)

Com o equipamento finalizado, o próximo passo foi realizar a captura das imagens para análise. A fim de validar a metodologia de classificação de óleos *in loco* e para facilitar a aquisição das amostras para análise, decidiu-se por utilizar recipientes de óleo de soja, visto que tem um valor comercial reduzido quando comparados a outros óleos vegetais.

Foram então adquiridas diferentes marcas nacionais de óleo de soja de diferentes lotes no decorrer das semanas do mês de Julho/2020. A relação das marcas de óleo e a quantidade de lotes podem ser observadas na Tabela 1 sendo que as nomeclaturas Marca01,..., Marca05 correspondem a diferentes marcas de óleo de soja disponíveis no mercado.

Marca	Quantidade de Lotes Diferentes
Marca01	2
Marca02	3
Marca03	4
Marca04	5
Marca05	2

Tabela 1: Relação das marcas de óleo de soja e quantidade de lotes diferentes

Fonte: Autoria própria (2020)

Para cada amostra de óleo, foram capturadas e armazenadas em formato JPEG 30 imagens digitais de 1600x900 pixels com intervalo de 1 segundo entre as capturas. Realizada a aquisição, foram calculados a partir da região de interesse (ROI do inglês *region of interest*), o pixel médio,

$$p_m = \frac{1}{N \times M} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M l_{ij}^k, \quad (3)$$

e o vetor de pixel médio,

$$\overline{p_m} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N l_i^k, \quad (4)$$

sendo que N é o número de linhas e M o número de colunas da ROI. O termo k representa as componentes dos sistemas de cores utilizados, neste caso são os sistemas RGB, HSV e *GrayScale*, fazendo com que $k = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ para cada componente de cor $\{R, G, B, H, S, V \text{ e } GrayScale\}$. Um exemplo de ROI de uma das imagens capturadas durante os testes pode ser observado na Figura 4.

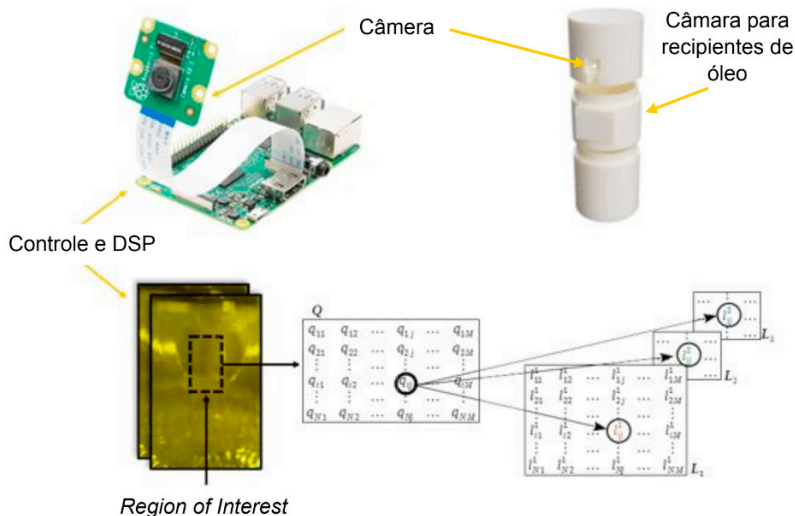


Figura 4: Diagrama de funcionamento do sistema de captura

Fonte: Autoria própria (2020)

Todas as imagens foram processadas, obtendo-se a partir da região de interesse p_m e \bar{p}_m que, posteriormente, foram estudados com o PCA e o LDA. Com o PCA reduz-se a dimensionalidade, transformando um conjunto de dados em um subespaço com dimensões reduzidas. De acordo com Tharwat (2016), essa redução de dimensionalidade se dá pela identificação de variáveis que não são informativas, ou seja, que não acrescentam informações ao estudo e também reduzindo variáveis que apresentam informações redundantes. Os resultados obtidos do PCA, foram utilizados como parâmetros de entrada no LDA, que é um “classificador utilizado para encontrar uma combinação linear entre características que agrupem ou separem duas ou mais classes de objetos ou eventos” (THARWAT *et al.*, 2018).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento das imagens, p_m e \bar{p}_m foram utilizadas como parâmetro de entrada no PCA e LDA. Os dados dos óleos vegetais foram analisados das seguintes maneiras: (a) por lote; e (b) por marca. Essa divisão teve por objetivo verificar se o método de classificação conseguiria diferenciar tanto os lotes quanto as marcas utilizadas.

Percebeu-se que utilizando a separação por lotes no PCA, independente de se utilizar, p_m ou \bar{p}_m resultou em 100% de separação das amostras em grupos, como pode ser observada na Figura 5 para o caso de p_m e Figura 6 para o caso de \bar{p}_m . Era esperado que as amostras de uma mesma marca ficassem mais próximas umas das outras, dada as semelhanças entre lotes de uma mesma marca. Ao utilizar esses dados como parâmetro

para o LDA, obteve-se uma classificação global de 100% usando-se somente uma amostra de teste de um mesmo lote.

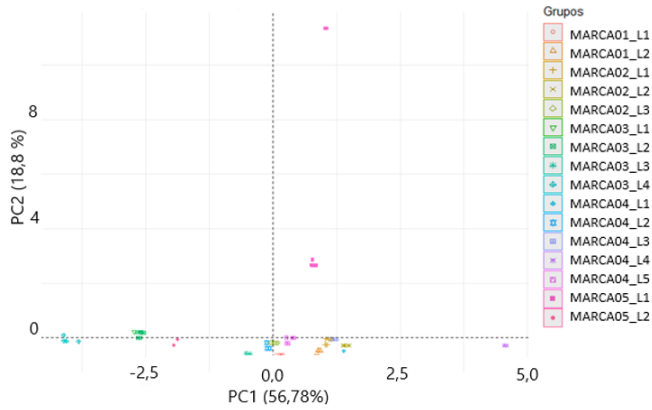


Figura 5: Resultado do PCA grupamento por lotes usando-se p_m
 Fonte: Autoria própria (2020)

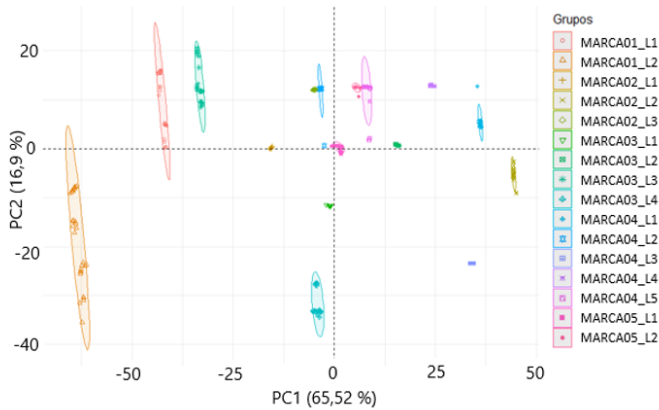


Figura 6: Resultado do PCA grupamento por lotes usando-se \bar{p}_m
 Fonte: Autoria própria (2020)

Ao utilizar a separação dos dados por marca, sem considerar os lotes, percebeu-se que o PCA conseguiu definir os grupamentos para as marcas, porém como pode ser observado no gráfico da Figura 7 para o caso de p_m e Figura 8 para o caso de \bar{p}_m houve sobreposição dos dados. Com a separação das amostras apenas por marca, a taxa de classificação global do LDA diminuiu fato indicado pela sobreposição observada no PCA. A teoria mostra que quanto mais informação melhor se dá o processo de classificação, mas neste caso, a inserção de novas marcas com baixa variabilidade entre si pode ter confundido

o classificador, tornando necessário a inserção de um maior número de amostras (i.e., mais recipientes de cada marca de óleo).

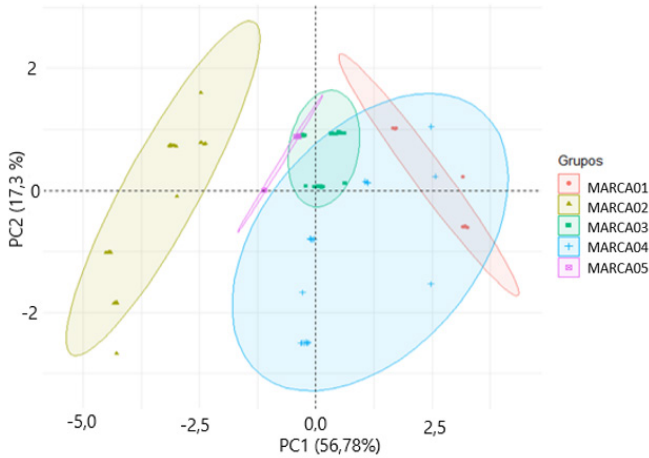


Figura 7: Resultado do PCA grupamento por marcas usando-se p_m

Fonte: Autoria própria (2020)

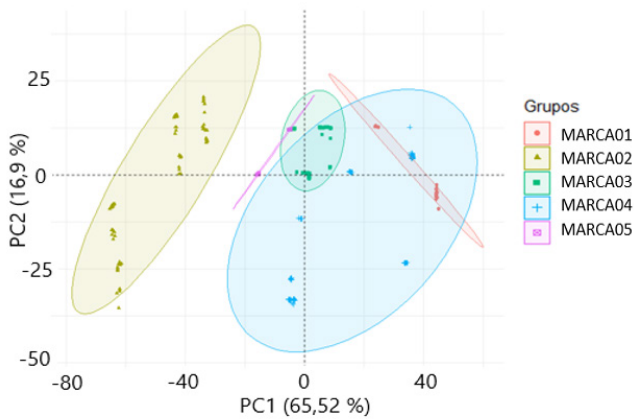


Figura 8: Resultado do PCA grupamento por MARCAS usando-se \bar{p}_m

Fonte: Autoria própria (2020)

Observou-se certa semelhança entre os gráficos de scores dos grupamentos produzidos pelo PCA para p_m separado por marcas e \bar{p}_m separado por marcas, e também entre a taxa de acerto global observado com o LDA. Isso significa que se for para se escolher entre os dois métodos para ser utilizado no equipamento utilizando-se do

Raspberry para o processamento dos dados, a escolha mais eficiente seria utilizar p_m médio para a classificação, visto que a sua implementação teria uma menor complexidade computacional.

4 | CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o funcionamento do protótipo do dispositivo, tanto na parte de *software* quanto de *hardware* está de acordo com o esperado. Algumas mudanças precisam ser realizadas em relação a dissipação de calor e na estrutura física, compactando os diferentes componentes do sistema. O desenvolvimento a partir de um sistema pré-existente possibilita que quaisquer atualizações de *firmware* ou *hardware* sejam facilmente transpostas de um equipamento para o outro. Em relação a análise dos óleos sem a violação das embalagens, ainda não se pode concluir muito, dada a pequena quantidade de amostras empregada. Outro ponto importante é saber identificar qual diferença entre as amostras está sendo considerada, visto que a geometria de cada embalagem de óleo, de cada marca, é diferente, fazendo com que as amostras possam estar sendo diferenciadas apenas pela distorção da luz incidente nas diferentes geometrias das garrafas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq – Brasil.

REFERÊNCIAS

BURCKHARDT, G. M; LENZI, M. K. **Uso da imagem digital para quantificação de misturas de azeite de oliva e óleo de canola**. Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, vol.35, n.2, 2018.

GODOY, A. C. et al. **Snapshots analyses for turbidity measurements in water**. Water, Air, & Soil Pollution, v. 229, n. 12, p. 378, Nov 2018.

KARBASIAN, M; GIVIANRAD, M.H.; RAMEZAN, Y. **A rapid method for detection of refined olive oil as adulterant in extra virgin olive oil by differential scanning calorimetry**. Oriental Journal of Chemistry, vol 31, p. 1735-1739, 2015.

LIPP, M. **Ingredient adulteration undermines food safety**. Revista FoodSafety Magazine, Glendale, California. Março 2012 Disponível em: <https://www.foodsafetymagazine.com/magazine-archive1/februarymarch-2012/ingredient-adulteration-undermines-food-safety/> Acesso em Agosto de 2020.

MANNING, L.; SMITH, R. **Providing authenticated food an opportunity-driven framework for small food companies to engage consumers and protect the integrity of the food supply chain**. The International Journal of Entrepreneurship and Innovation, vol. 16, p. 97-110, 2015.

MILANEZ, T. M.; DANIELLE, K.; PONTES, M. J. C. **Classification of extra virgin olive oil and verification of adulteration using digital images and discriminant analysis**, Anais. Methods vol. 7., 2015.

THARWAT, **A. Principal component analysis** - a tutorial. Revista International Journal of Applied Pattern Recognition. .vol. 3. p. 197, 2016.

THARWAT, A. G.; IBRAHIM, T; ABDELHAMEED, H.; ABOUL, E. **Linear discriminant analysis: A detailed tutorial**. Revista Ai Communications. Vol. 30. p. 169-190, 2018.

VAN WETTEN, I. A.; VAN HERWAARDEN, A. W.; SPLINTER, R.; BOERRIGTER-EENLING, R.; VAN RUTH, S. M. **Detection of sunflower oil in extra virgin olive oil by fast differential scanning calorimetry**. Thermochim. Acta, 2015.

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.

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 dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acidentes fatais 112, 113, 117

AD633 131, 132, 133, 135, 136, 137, 138

Análise luminotécnica 25

Arduino 37, 39, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 59, 111, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 128, 129, 130

Automação 9, 22, 36, 38, 47, 48, 59, 119, 121, 123, 127, 128, 150, 154, 155

Azeite 159, 160, 161, 163, 168

B

Backflashover 11, 12, 19, 20, 21, 22, 60, 61, 62, 70, 71, 72, 73

Bancada experimental 77, 78, 84, 85, 88

Bluetooth 36, 37, 39, 46, 47, 48, 49, 122

Boxplot 112, 113, 114, 115, 116

C

Classificadores 159, 160

Controle volt-watt 89

Costs 21, 36

D

DAC 131, 132, 134, 135, 137, 138

Descargas atmosféricas 11, 12, 60, 61

Design automation 36, 141

Distúrbios da voz 1

E

Eletricidade 45, 112, 113, 118, 120, 121, 129

Eletrodo de superfície 140

Eletromiografia 140, 143, 147

EMG 140, 141, 142, 143, 145

Espectrofotometria 50

Estágio de saída 131, 132, 133, 134, 136, 138

Estudo de cores 25

Extensão 148, 157

F

Fotometria 103, 104, 105

G

Geração solar 89, 90, 101

Gerador de ondas arbitrárias 131, 132, 138, 139

I

Iluminação no ambiente hospitalar 25

Infrared sensors 36

Instrumentos de medição 103

Internet das coisas 119, 120, 122, 130

L

Lighting control 36, 49

Linhas de transmissão 11, 12, 60, 61, 117

M

Microcontroladores 103

Microprocessador 36

Microrrede 77, 78, 79, 87

O

Óleo vegetal 159, 161

P

Perceptron multicamadas 1, 3

Processamento de imagem 159

Q

Qualificação profissional 148, 149, 155, 156

R

Raspberry Pi 46, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 159, 160, 163

Reconhecimento de padrão 159, 160

Recursos distribuídos de energia 77, 78

S

Sistemas de aterramento 11, 12, 61

Sobretensão 89, 91, 98, 100, 101

Software de controle 50

T

Transformada Wavelet Packet 1, 2

U

Usinas termelétricas 148, 149, 152, 155

ENGENHARIA ELÉTRICA:

COMUNICAÇÃO INTEGRADA
NO UNIVERSO DA ENERGIA

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:

COMUNICAÇÃO INTEGRADA
NO UNIVERSO DA ENERGIA

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

 **Atena**
Editora

Ano 2021