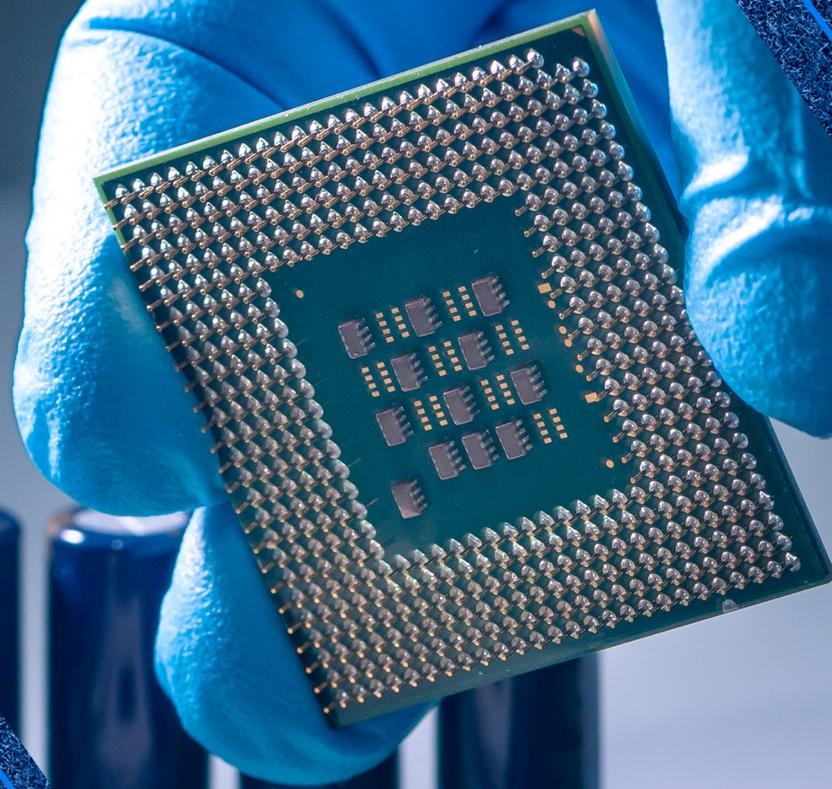


Atena
Editora

Ano 2020

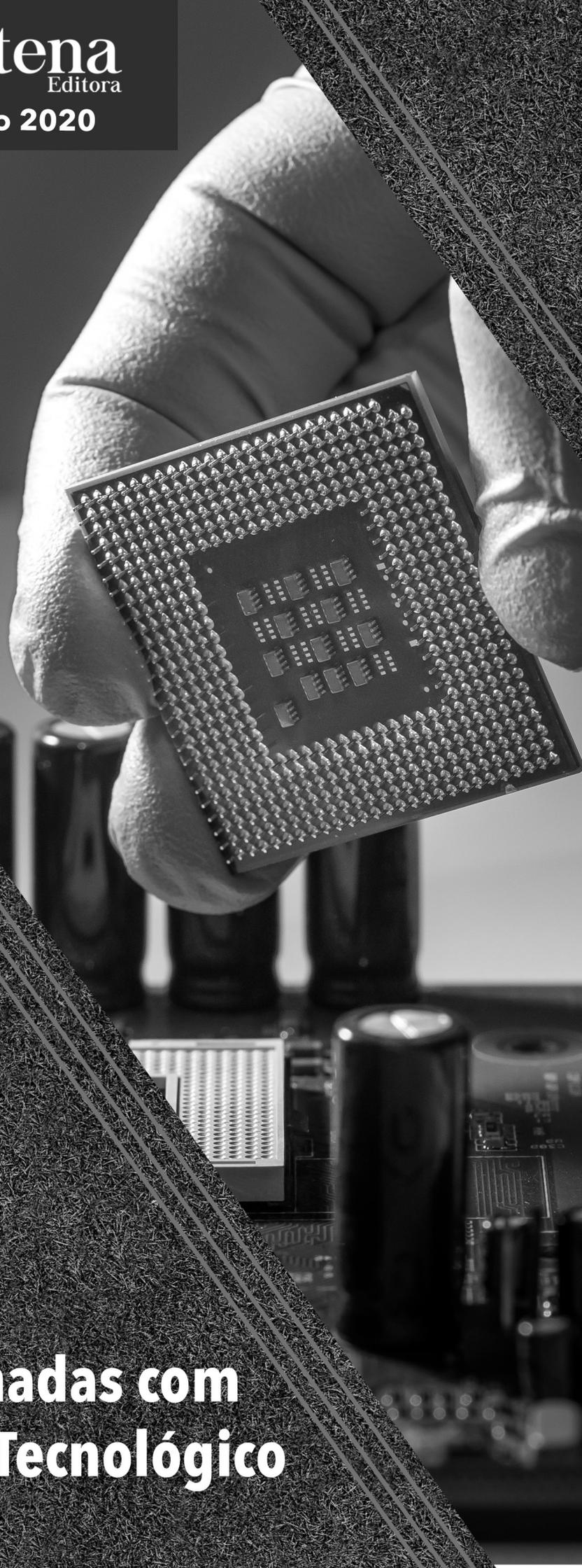


João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
Marcelo Henrique Granza
(Organizadores)

Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico

Atena
Editora

Ano 2020



João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
Marcelo Henrique Granza
(Organizadores)

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Camila Alves de Cremo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

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

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

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. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

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 – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

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
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. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
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^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. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

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. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
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 Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 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. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 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. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	<p>Engenharia elétrica e de computação [recurso eletrônico] : atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 1 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann, Marcelo Henrique Granza. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-167-1 DOI 10.22533/at.ed.671200207</p> <p>1. Ciência da computação – Pesquisa – Brasil. 2. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Granza, Marcelo Henrique.</p> <p style="text-align: right;">CDD 623.3</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

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

Produzir conhecimento em engenharia elétrica e da computação é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. 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
Marcelo Henrique Granza

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE PARA ESTUDO EM CONTROLE DE UM ROBÔ MÓVEL DE EQUILÍBRIO DINÂMICO	
Alex Sandro Garefa Guyllherme Emmanuel Tagliaferro de Queiroz Luis Antonio Bassora Flavio Eduardo Tapparo	
DOI 10.22533/at.ed.6712002071	
CAPÍTULO 2	17
ROBÔ PARA INSTALAÇÃO DE SINALIZADORES AVIFAUNA	
Bruno Monteiro Costa Máiquel Bruno de Andrade Rezende Waldir Alves Diniz Ricardo de Souza Marcelo Clécio Paula da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.6712002072	
CAPÍTULO 3	26
PROSPECTOS PARA A EVOLUÇÃO DA INTERFACE HUMANO-COMPUTADOR EM CENTROS DE CONTROLE DE ENERGIA ELÉTRICA	
Luiz Corrêa Lima	
DOI 10.22533/at.ed.6712002073	
CAPÍTULO 4	40
PROJETO CANAÃ - IRRIGADOR AUTOMÁTICO PARA O AGRONEGÓCIO	
André Kroupa Eldon Moura Cláudio Matheus da Costa Comin Rogério Luis Spagnolo da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.6712002074	
CAPÍTULO 5	54
PAINEL DE BORDO - UMA INÉDITA PLATAFORMA COMPUTACIONAL EM UTILIZAÇÃO NO NOVO CENTRO DE OPERAÇÃO DA CEMIG-D	
Tiago Vilela Menezes Bruno Henrique da Silva Carlos Jose de Andrade Huliton Paz de Oliveira Marco Aurélio da Silva Fereda Odimar José Bezerra Lima Rafael Carneiro Motta	
DOI 10.22533/at.ed.6712002075	
CAPÍTULO 6	69
PARADIGMAS DAS TECNOLOGIAS 5G NA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS VERTICAIS NA INDÚSTRIA 4.0	
Daniel Rodrigues Ferraz Izario João Luiz Brancalhona Filho Yuzo Iano Karine Mendes Siqueira Rodrigues Ferraz Izario	
DOI 10.22533/at.ed.6712002076	

CAPÍTULO 7	81
DATA REGENERATION 2R IN OPTICAL COMMUNICATION NETWORK BASED ON MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER WITH ACOUSTIC-OPTICAL FILTER AND HIGHLY NON-LINEAR PHOTONIC CRYSTAL FIBER	
Fabio Barros de Sousa Fiterlinge Martins de Sousa Jorge Everaldo de Oliveira Elizabeth Rego Sabino Marcos Benedito Caldas Costa	
DOI 10.22533/at.ed.6712002077	
CAPÍTULO 8	95
PROJETO DE UMA ANTENA PATCH PLANAR UTILIZANDO A SUPER FÓRMULA DE GIELIS	
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira Pedro Carlos de Assis Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.6712002078	
CAPÍTULO 9	108
UMA CONTRIBUIÇÃO NA AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SATISFAÇÃO DO CLIENTE PARA OS SERVIÇOS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS COM EQUAÇÕES ESTRUTURAIS	
Gutembergue Soares da Silva André Pedro Fernandes Neto Fred Sizenando Rossiter Pinheiro Antonio Salvio de Abreu	
DOI 10.22533/at.ed.6712002079	
CAPÍTULO 10	130
ATAQUES E DESCOBERTA DE VULNERABILIDADES EM REDES CORPORATIVAS	
Roger Robson dos Santos Jackson Mallmann	
DOI 10.22533/at.ed.67120020710	
CAPÍTULO 11	139
MODELO MATEMÁTICO PARA CONSOLIDAÇÃO DE MÁQUINAS VIRTUAIS	
Alexandre Henrique Teixeira Dias Luiz Henrique Andrade Correia	
DOI 10.22533/at.ed.67120020711	
CAPÍTULO 12	151
CAPTURE THE FLAG: MÉTODO DE APRENDIZADO PARA A DISCIPLINA DE FORENSE COMPUTACIONAL EM UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA	
Carlos Eduardo de Barros Santos Júnior Ana Clara Nobre Mendes Jhonattan Carlos Barbosa Cabral Juliana Barbosa dos Santos Erick de Oliveira Silva Pedro Henrique Rodrigues Emerick	
DOI 10.22533/at.ed.67120020712	
CAPÍTULO 13	157
A METODOLOGIA EPRI PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS CIBERNÉTICOS NAS INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E SUA RELAÇÃO COM A NORMA IEC 62443-2-1	
Luiz Augusto Kawafune Campelo	

CAPÍTULO 14	170
ANÁLISE DA PERFORMANCE DO MRE E SEUS IMPACTOS COMERCIAIS – PROPOSTA DE REVISÃO DA REGULAÇÃO	
João Carlos Mello Leonardo Calabro Vinicius Ragazi David Daniela Souza Luiz Laércio Simões Machado Junior Renato Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.67120020714	
CAPÍTULO 15	190
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA INCLUSÃO EDUCACIONAL DE PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA	
Felipe Massayuki Quiotoqui Italo Rodrigues da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.67120020715	
CAPÍTULO 16	200
SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DE CÂNCER DE MAMA	
Gustavo da Silva Maciel Wagner Kenhiti Nakamura Júnior Luiz Francisco Granville Gonçalves Leonardo Plaster Silva Simone Silva Frutuoso de Souza Fábio Roberto Chavarette Fernando Parra dos Anjos Lima	
DOI 10.22533/at.ed.67120020716	
CAPÍTULO 17	213
AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS NÃO INVASIVAS DE MEDIÇÃO DE GLICOSE EM HUMANOS	
Leanderson André Pedro Bertemes Filho	
DOI 10.22533/at.ed.67120020717	
CAPÍTULO 18	224
ENTENDIMENTO DOS CONTROLES E POSSÍVEIS CONFLITOS DE PRIVACIDADE NAS REDES SOCIAIS ONLINE	
Talita de Souza Costa Marbilia Possagnolo Sérgio Regina Marin	
DOI 10.22533/at.ed.67120020718	
CAPÍTULO 19	236
MODELAGEM DE PROBLEMA ELETROSTÁTICO UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS	
Julia Grasiela Busarello Wolff Pedro Bertemes Filho	
DOI 10.22533/at.ed.67120020719	

CAPÍTULO 20	252
SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE CULTURA CELULAR <i>IN VITRO</i> VIA BIOIMPEDÂNCIA ELÉTRICA: REGRAS DE PROJETO	
Kaue Felipe Morcelles	
Pedro Bertemes Filho	
DOI 10.22533/at.ed.67120020720	
SOBRE OS ORGANIZADORES	265
ÍNDICE REMISSIVO	266

DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE PARA ESTUDO EM CONTROLE DE UM ROBÔ MÓVEL DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

Alex Sandro Garefa

Centro Universitário do Norte Paulista – UNORP
São José do Rio Preto – SP
<http://lattes.cnpq.br/0746206919629713>

Guyherme Emmanuel Tagliaferro de Queiroz

Centro Universitário do Norte Paulista – UNORP
São José do Rio Preto – SP
<http://lattes.cnpq.br/4677428607319273>

Luis Antonio Bassora

Centro Universitário do Norte Paulista – UNORP
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/5727560229434901>

Flavio Eduardo Tapparo

Centro Universitário do Norte Paulista – UNORP
São José do Rio Preto
<http://lattes.cnpq.br/7340217792243964>

RESUMO: O software *simulink* é um ambiente de diagrama e blocos que além de permitir simular modelos possui um recurso capaz de gerar e implementar algoritmo em *hardware*, como sistemas microcontrolados. Neste trabalho, foi utilizado um robô de equilíbrio dinâmico constituído por sensores e atuadores que se

comunicam por meio de um microcontrolador. Neste contexto, deseja-se desenvolver uma interface por meio do *simulink* para se comunicar com este robô. O desenvolvimento da interface consistiu em utilizar blocos para comunicação com Arduino para criar rotinas de leitura e acionamento. O modelo dinâmico foi obtido descrevendo o sistema como a diferença entre suas energias cinéticas e potenciais (método de Lagrange) e foi representado na forma de espaço de estados. A caracterização permitiu modelar o sistema de maneira completa. Definiu-se então um controlador (LQR) para testar no modelo e foi aplicado um filtro recursivo (Filtro de Kalman) para reduzir ruídos na medida de inclinação obtida pelos sensores inerciais. O modelo caracterizado permitiu obter o mapa de polos e zeros e a resposta natural do sistema, confirmando sua instabilidade. Utilizando o *matlab*, obteve-se os ganhos para o controlador e simulou-se o sistema, obtendo sua resposta sob perturbação. Concluindo, a interface desenvolvida foi capaz de implementar as rotinas de maneira efetiva. O modelo obtido permitiu definir os ganhos pelo LQR, estabilizando o sistema sob perturbação, viabilizando a utilização dos valores para executar testes de controle utilizando a interface desenvolvida, além disso, a implementação do

filtro reduziu parte do ruído presente na medida.

PALAVRAS-CHAVE: Equilíbrio dinâmico; *simulink*; LQR; Filtro de Kalman.

DEVELOPMENT OF AN INTERFACE FOR CONTROL STUDY OF A MOBILE ROBOT WITH DYNAMIC BALANCE

ABSTRACT: The *simulink* software is a diagram and block environment that, besides allowing simulating models, has a resource capable of generating and implementing algorithms in hardware, such as microcontrolled systems. In this work, a dynamic balance robot consisting of sensors and actuators that communicate through a microcontroller was used. In this context, we want to develop an interface using *simulink* to communicate with this robot. The development of the interface consisted of using blocks to communicate with Arduino to create reading and triggering routines. The dynamic model was obtained by describing the system as the difference between its kinetic and potential energies (Lagrange method) and was represented in the form of state space. The characterization allowed modeling the system in a complete way. A controller (LQR) was then defined to test on the model and a recursive filter (Kalman filter) was applied to reduce noise in the slope measurement obtained by the inertial sensors. The characterized model allowed obtaining the map of poles and zeros and the natural response of the system, confirming its instability. Using *matlab*, gains were obtained for the controller and the system was simulated, obtaining its response under perturbation. In conclusion, the developed interface was able to implement the routines effectively. The model obtained allowed to define the gains by the LQR, stabilizing the system under disturbance, enabling the use of the values to perform control tests using the developed interface, in addition, the implementation of the filter reduced part of the noise present in the measure.

KEYWORDS: Dynamic balance; *simulink*; LQR; Kalman filter.

1 | INTRODUÇÃO

O *matlab* tem se mostrado uma importante ferramenta para o desenvolvimento de novas tecnologias, abrangendo diversas áreas da engenharia, como sistema de controle e automação de processos. O software utiliza uma linguagem de programação reduzida baseada em cálculo com matrizes. Os aplicativos e ferramentas disponibilizados pela *Mathworks* permitem realizar diversas tarefas como análise de dados, simulação de sistemas físicos e implementação de algoritmos, de forma confiável e com esforço reduzido, tornando interessante utilizar esse software para desenvolver novos projetos.

Uma das ferramentas que compõem o *matlab* é o *simulink*, muito utilizado para simular modelos e projetar sistemas físicos por meio de um ambiente de diagrama de blocos. O *simulink* possui um recurso para auxiliar na viabilização de projetos denominada *simulink hardware support*, capaz de gerar e implementar algoritmo em hardware de forma

automatizada permitindo transmitir e receber dados em tempo real. Essa ferramenta fornece funções e blocos para *matlab/simulink* apresentando compatibilidade com diversos tipos de hardwares, como dispositivos móveis Android e sistemas microprocessados e microcontrolados, como plataformas Raspberry e Arduino (MATHWORKS, 2018).

Devido ao baixo custo e simplicidade do microcontrolador, optou-se por trabalhar com o *simulink hardware support* para Arduino, uma plataforma de *hardware* e *software* aberto capaz de interagir com o ambiente, lendo sensores e acionando atuadores conforme as instruções do algoritmo implementado, podendo ser utilizado como o cérebro dos mais variados projetos, compreendendo desde projetos simples, como piscar um LED, até sistemas complexos, como veículos autônomos, robôs bípedes e robô de equilíbrio dinâmico sobre esferas ou rodas.

O robô, objeto de estudo desse trabalho, conhecido como robô de equilíbrio dinâmico é constituído, basicamente, por sensores e atuadores que se comunicam por meio de um microcontrolador buscando manter-se em equilíbrio. Esse sistema possui dinâmica instável e por esse motivo tem sido amplamente utilizado para estudo em teoria de controle, permitindo que sejam testados diversos tipos de controladores. Contudo, muitas vezes, para substituir um controlador é necessário alterar grande parte da estrutura do software, exigindo a aplicação de muito esforço.

Neste contexto, o desenvolvimento de uma interface no ambiente de diagrama de blocos do *simulink* que contenha as rotinas básicas de leitura e atuação para um robô de equilíbrio dinâmico gerenciado por um Arduino, permite testar diferentes técnicas de controle sem grandes modificações no software, reduzindo o esforço aplicado na criação de algoritmos.

O robô utilizado para o desenvolvimento deste trabalho (figura 1) possui um microcontrolador Arduino Mega 2560, dois motores de corrente contínua (CC) de 12V com caixa de redução (1:43,8) e encoder indutivo incremental, uma ponte-H (L298N), uma bateria LiPO e uma unidade de medida inercial (IMU) MPU6050.



Figura 1 - Robô móvel de duas rodas.

Fonte: <http://makerstudio.cc>

O acionamento dos motores CC é realizado pela aplicação de um sinal de largura de pulso modulada (PWM) na ponte H, chaveando o motor com alta frequência e conduzindo energia durante o ciclo ativo desse sinal, controlando a quantidade de energia que é transferida da bateria para o motor, e conseqüentemente, a velocidade de rotação dos motores.

A leitura de posição e velocidade dos motores é realizada por meio dos encoders, sensores capazes de observar deslocamento linear. Seus terminais (canais A e B) apresentam o mesmo sinal defasado em 90 graus entre si, tornando possível identificar o sentido de rotação do eixo. A posição pode ser registrada utilizando um microcontrolador, configurando os canais como pinos de interrupção, pausando o programa principal sempre que o motor rotacionar.

A observação do ângulo de inclinação do robô é realizada por meio da IMU, um dispositivo composto por um conjunto de acelerômetros e giroscópios, ambos de três eixos. Os acelerômetros medem a aceleração ao longo de seus eixos e o ângulo de inclinação é obtido por uma relação trigonométrica entre as três medidas. Os giroscópios medem a velocidade angular em torno de seus eixos, e o ângulo de inclinação é obtido pela integração dessas medidas. A comunicação entre o microcontrolador e a IMU é realizada a partir do protocolo de comunicação I²C, permitindo configurar parâmetros e ler registradores.

Para implementar um controlador em determinado sistema, a observação das variáveis de controle deve ser realizada de maneira confiável e conter o mínimo de ruído possível. Contudo, os sensores inerciais estão propensos a erros na medida quando utilizados para medir ângulo de inclinação. Os acelerômetros são extremamente sensíveis e os giroscópios integram uma parcela de erro junto com a medida. A aplicação de um filtro pode resolver esse problema e melhorar a qualidade da medida do ângulo de inclinação fornecida pela IMU.

2 | OBJETIVO

O objetivo fundamental deste trabalho é desenvolver uma interface utilizando o ambiente de diagrama de blocos *simulink* e validar seu desempenho. A interface deve conter as rotinas fundamentais de leitura e atuação para um robô de equilíbrio dinâmico e o desempenho pode ser validado utilizando a interface para implementar um sistema de controle no robô.

3 | METODOLOGIA

A interface para comunicação com o robô foi desenvolvida no ambiente *simulink*

utilizando os blocos disponibilizados por meio do *simulink hardware support* para comunicação com Arduino. A leitura dos encoders foi realizada por meio de interrupções externas, acessadas por um bloco S-funtion, utilizado para integrar funções existentes. A comunicação com a IMU foi realizada por protocolo de comunicação I²C, utilizando blocos de leitura e escrita I²C para Arduino como funções dentro de um *Stateflow*, um ambiente para programação lógica baseado em fluxograma de estado. Para o acionamento dos motores, foram utilizados blocos de saída digital para controlar o sentido de rotação e bloco de saída PWM para controlar a velocidade.

O modelo adotado para escrever as equações dinâmicas que descrevem a dinâmica do robô foi obtido pelo método desenvolvido por Lagrange, amplamente abordado por Mayback (1979), posteriormente as equações foram organizadas na forma de espaço de estados. A determinação dos parâmetros do robô (massas, distâncias e inércias), necessários para definir de maneira completa o modelo em espaço de estados, foi realizada de forma direta, isto é, com instrumentos de medida.

Para a validação da interface, tendo em vista o modelo representado em espaço de estados, a escolha mais natural para o controlador foi o Regulador Linear Quadrático (LQR), tendo seus ganhos obtidos com auxílio do *matlab*. Objetivando reduzir os erros na medida do ângulo de inclinação foi aplicado um método estatístico denominado Filtro de Kalman.

4 | CONSTRUÇÃO DA INTERFACE

A interface desenvolvida para comunicação com o robô de equilíbrio dinâmico contém as rotinas básicas para realizar a leitura dos sensores (encoder e IMU) e atuadores (motores CC) e foi desenvolvida por meio do ambiente *simulink*.

A leitura da posição por meio dos encoders é realizada por um bloco *S-function*, que foi programado para identificar interrupções externas sempre que a roda se deslocar, mantendo a medida sempre atualizada.

A comunicação com a IMU é feita por meio da programação de um *Stateflow*, o código configura parâmetros como escala dos sensores e taxa de atualização de medidas e solicita as medidas dos sensores, utilizando funções com blocos de comunicação I²C para isso.

Para controlar a sentido dos motores, a saída do controlador é enviada para dois blocos condicionais que estão conectados a dois blocos de saída digital, se a saída do controlador for positiva, então os motores giram para um sentido, se for negativo inverte o sentido de rotação. No controle de velocidade dos motores, a saída do controlador é limitada por um bloco de saturação definido para o intervalo 0-255 e então é enviado para um bloco de PWM. O diagrama contendo a interface completa pode ser visualizado na figura 2.

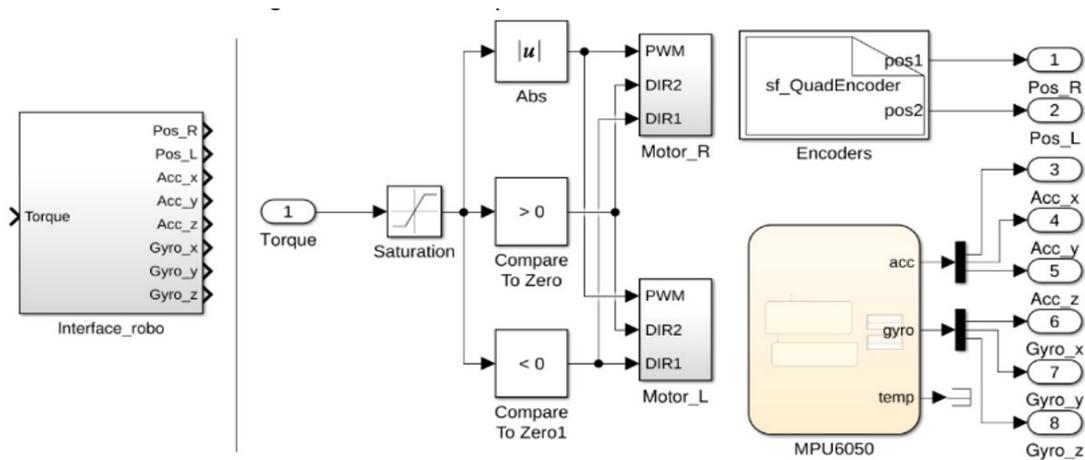


Figura 2 – Interface para rotinas básicas do robô.

Fonte: Próprio autor.

5 | MODELO DINÂMICO DO ROBÔ

O modelo físico, representado na figura 3, tem a dinâmica semelhante ao problema do pêndulo invertido montado sobre uma superfície móvel estudado por Ogata (2003), com a diferença de estar sobre duas rodas. Para efeito de análise, este sistema também pode ser dividido em duas partes: corpo e roda. Onde as massas do corpo e da roda são dadas por m e m_w em quilogramas (kg). O raio da roda é dado por R e a distância do centro da roda ao centro de massa do corpo é L , ambos em metros (m).

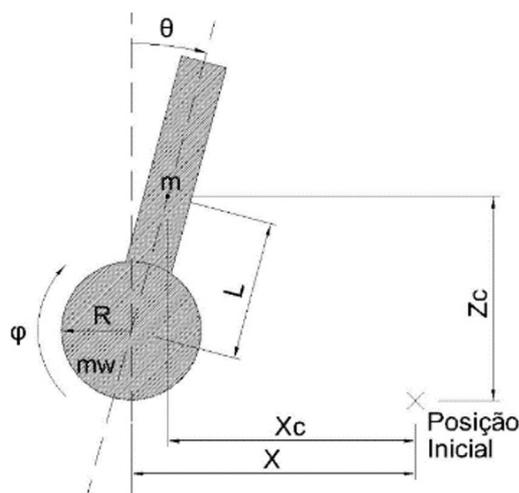


Figura 3 - Diagrama de corpo livre do robô móvel.

Fonte: Próprio autor.

A variável x representa o deslocamento horizontal da roda em relação à origem, x_c é o deslocamento horizontal do centro de massa do corpo em relação à origem e z_c é a

altura do centro de massa do corpo em relação ao piso, em metros (m). A variável φ é o ângulo de rotação da roda em relação à origem e θ é a inclinação do corpo em relação à vertical, ambas em radianos (rad). Onde,

$$x = R\varphi \quad (1)$$

$$\dot{x} = R\dot{\varphi} \quad (2)$$

$$x_c = R\varphi + L \operatorname{sen} \theta \quad (3)$$

$$\dot{x}_c = R\dot{\varphi} + L\dot{\theta} \cos \theta \quad (4)$$

$$z_c = R + L \cos \theta \quad (5)$$

$$\dot{z}_c = -L\dot{\theta} \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

Com o intuito de obter as equações dinâmicas utilizou-se o método de Lagrange com a finalidade de reduzir a quantidade de coordenadas ao descrever os movimentos. A equação de Lagrange é descrita como a diferença entre as energias cinéticas e potenciais do sistema (NIVALDO, 2004).

$$L = E_C - E_P \quad (7)$$

A energia cinética total do sistema é dada pela soma das energias de rotação e de translação do corpo e da roda. Onde I é a inércia do corpo e I_w é a inércia da roda, ambas em kg.m^2 .

$$\begin{aligned} E_C &= \frac{1}{2}m\dot{x}_c^2 + \frac{1}{2}m\dot{z}_c^2 + \frac{1}{2}m_w\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I_w\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \\ &= \frac{1}{2}(mR^2 + m_wR^2 + I_w)\dot{\varphi}^2 + mRL \cos \theta \dot{\varphi}\dot{\theta} + \frac{1}{2}(mL + I)\dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Tendo como referência a altura do pêndulo na vertical, a energia potencial do sistema é descrita por:

$$E_P = mg(R + L \cos \theta) - mg(R + L) = mgL(\cos \theta - 1) \quad (9)$$

Definidas as energias, as equações (8) e (9) podem ser substituídas nos termos da equação de Lagrange (7), resultando em:

$$L = \frac{1}{2}(I_w + m_wR^2 + mR^2)\dot{\varphi}^2 + mRL\dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2}(I + mL^2)\dot{\theta}^2 - mgL(\cos \theta - 1) \quad (10)$$

Adotando como coordenadas generalizadas as componentes de posição angular do corpo (θ) e da roda (φ), a dinâmica do sistema é reduzida para dois graus de liberdade cujas respectivas equações são obtidas pela equação de Euler-Lagrange, como demonstrado

por Bobrow (2015):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (11)$$

A equação (14) representa o torque generalizado μ para a coordenada φ e a equação (17) mostra o torque generalizado χ para a coordenada θ .

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = (I_w + m_w R^2 + m R^2) \dot{\varphi} + m R L \dot{\theta} \cos \theta \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = (I_w + m_w R^2 + m R^2) \ddot{\varphi} + m R L \ddot{\theta} \cos \theta - m R L \dot{\theta}^2 \sin \theta = \mu \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m R L \dot{\varphi} \cos \theta + (I + m L^2) \dot{\theta} \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m R L \dot{\varphi} \sin \theta + m g L \sin \theta \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = (I - m L^2) \ddot{\theta} + m R L \ddot{\varphi} \cos \theta - m R L \sin \theta = \chi \quad (17)$$

Reorganizando estas equações na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_w + (m_w + m) R^2 & m R L \cos \theta \\ m R L \cos \theta & I + m L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -m R L \sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -m g L \sin \theta \end{bmatrix} \theta \quad (18)$$

Para admitir as perdas por atrito, os torques generalizados são definidos como a diferença entre torque aplicado e torque dissipado (no eixo e no piso). Os coeficientes que representam essa relação são, atrito de fricção (β_m) e atrito de rolamento (β_r).

$$\mu = \tau_0 - \tau_{eixo} - \tau_{piso} = \tau_0 - \beta_m (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) - \beta_r \dot{\varphi} \quad (19)$$

$$\chi = -\tau_0 + \tau_{eixo} = -\tau_0 + \beta_m (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) \quad (20)$$

Os torques são incluídos na matriz (18) e as equações dinâmicas são linearizadas em torno do eixo vertical admitindo θ muito pequeno, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} I_w + (m_w + m) R^2 & m R L \\ m R L & I + m L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_m + \beta_r & -\beta_m \\ -\beta_m & \beta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -m g L \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \tau_0 \quad (21)$$

A representação desse sistema no modelo conhecido como espaço de estados pode ser obtida conforme apresentado nas equações (22), (23) e (24), adotando as variáveis θ , φ , $\dot{\theta}$ e $\dot{\varphi}$ como as variáveis de estado e o torque aplicado (τ_0) como a entrada do sistema (DING; GAFFORD; KUNIO, 2012).

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + G\theta = H\tau_0 \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [-E^{-1}G] & [-E^{-1}F] & [-E^{-1}F] \\ 0 & [-E^{-1}G] & [-E^{-1}F] & [-E^{-1}F] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ [-E^{-1}H] \\ [-E^{-1}H] \end{bmatrix} \tau_0 \quad (23)$$

$$y = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (24)$$

A variável φ foi multiplicada por R para que seja observado o deslocamento horizontal x na equação de saída (24).

6 | CARACTERIZAÇÃO DO ROBÔ

Para definir o modelo de maneira completa, foi necessário realizar a caracterização do robô para obter alguns parâmetros específicos do sistema, estes parâmetros estão na tabela abaixo.

Parâmetro	Valor medido	Unidade de medida
Massa do chassi – m	0,536	kg
Massa da roda – m_w	$5,3 \times 10^{-2}$	kg
Distância entre o centro da roda e o centro de massa do corpo – L	$4,0 \times 10^{-2}$	m
Raio da roda – R	$3,25 \times 10^{-2}$	m
Momento de inércia do chassi – I	$8,6 \times 10^{-4}$	kg.m ²
Momento de inércia da roda – I_w	$5,6 \times 10^{-5}$	kg.m ²

Tabela 1: Características constantes do robô móvel

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 | SISTEMA DE CONTROLE

Para realizar o controle em malha fechada no espaço de estados utilizou-se o método de alocação de polos, multiplicando uma matriz de ganhos (K) às variáveis de estados x (t) observadas, tal que satisfaça a equação (25) (DISTEFANO; STUBBERUD; WILLIAMS,

2011).

$$u(t) = -Kx(t) \quad (25)$$

O regulador linear quadrático (LQR) fornece um modo de cálculo sistemático para encontrar os valores para a matriz K , tal que minimize a função de energia $J(t)$, dada pela equação (26) (MAYBACK, 1979).

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Q x + u^* R u) dt \quad (26)$$

Onde as matrizes simétricas Q e R determinam a importância relativa do erro e o consumo da função de energia $J(t)$. A matriz K pode ser determinada por LQR utilizando o matlab, com o comando $lqr(A,B,Q,R)$.

8 | FILTRO DE KALMAN

Com a intenção de reduzir os erros na medida do ângulo de inclinação da IMU foi utilizado um filtro recursivo ótimo capaz de estimar os estados de um sistema linear, conhecido como Filtro de Kalman. De acordo com Mayback (1979) a equação (27) é a forma generalizada de um sistema linear e a equação (28) é a equação de saída, onde A , B e C são matrizes, k é o índice temporal, x representa o vetor de estados do sistema, u é a entrada do sistema, y é a saída, w é conhecido como ruído de processo e z o ruído de medida.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (27)$$

$$y_{k+1} = Cx_k + z_k \quad (28)$$

O vetor de estado que representa as variáveis da IMU na equação (29) é composto pela posição angular θ , velocidade angular $\dot{\theta}$ e a tendência da velocidade angular θ_b do giroscópio. A velocidade angular fornecida pelo giroscópio corresponde a entrada u do sistema e a posição angular fornecida de maneira indireta pelo acelerômetro é definida como a saída y , onde z_k é o ruído da medida do acelerômetro. A atualização das medidas é feita a cada intervalo de tempo T .

$$x_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\theta}_{bk} \end{bmatrix} \quad (29)$$

A equação (30) descreve a posição angular θ perturbada pelo ruído de posição $\theta_k \sim$.

$$\theta_{k+1} = \theta_k + T(\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{b_k}) + \theta_k \sim \quad (30)$$

A equação (31) descreve a velocidade angular $\dot{\theta}$ perturbada pelo ruído da velocidade $\dot{\theta}_k \sim$.

$$\dot{\theta}_{k+1} = \dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{b_k} + \dot{\theta}_k \sim \quad (31)$$

A tendência da velocidade angular $\dot{\theta}_b$ do giroscópio pode ser considerada uma constante que independe das variáveis citadas anteriormente. A tendência representa a parcela da medida do giroscópio que desvia de forma progressiva o valor medido do valor real.

O modelo que representa as variáveis da IMU na forma de equações lineares é obtido reorganizando as equações (29) (30) e (31) no modelo apresentado em (27) e (28), resultando nas equações abaixo.

$$\begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \dot{\theta}_{k+1} \\ \dot{\theta}_{b_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\theta}_{b_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_k + w_k \quad (32)$$

$$y_{k+1} = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ \dot{\theta}_{b_k} \end{bmatrix} + z_k \quad (33)$$

No desenvolvimento do filtro é necessário caracterizar o ruído do processo w_k e o ruído da medida z_k . A aferição das medidas dos sensores é feita com um intervalo de 0,01 segundos, a posição angular θ obtida pelo acelerômetro apresenta desvio padrão de $0,082^\circ$, a velocidade angular $\dot{\theta}$ do giroscópio apresenta desvio padrão de $0,03^\circ/\text{s}$, e a tendência de velocidade angular $\dot{\theta}_b$ do giroscópio, desvio padrão de $0,23^\circ/\text{s}$.

$$w_k = \begin{bmatrix} \theta_k \sim \\ \dot{\theta}_k \sim \\ \dot{\theta}_{b_k} \sim \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$z_k = \theta_k \sim \quad (35)$$

Assume-se que os ruídos são variáveis aleatórias, não estão correlacionados entre si, apresentam média zero e função de densidade de probabilidade com distribuição normal. Então as matrizes de covariância de ruído de processo S_z e de covariância de erro de medida S_w , estão representadas, respectivamente, nas equações (34) e (35),

onde $E(\cdot)$ significa esperança.

$$S_w = E(w w^T) \quad (36)$$

$$S_z = E(z z^T) \quad (37)$$

Substituindo a equação (34) e (35) em (36) e (37), obtém-se as matrizes de covariância de erro do processo e de medida, conforme (38) e (39).

$$S_w = E\left(\begin{bmatrix} \theta^{\sim} \\ \dot{\theta}^{\sim} \\ \dot{\theta}_b^{\sim} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^{\sim} & \dot{\theta}^{\sim} & \dot{\theta}_b^{\sim} \end{bmatrix}\right) = E\left(\begin{bmatrix} \theta^{\sim 2} & \theta^{\sim} \dot{\theta}^{\sim} & 0 \\ \dot{\theta}^{\sim} \theta^{\sim} & \dot{\theta}^{\sim 2} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\theta}_b^{\sim 2} \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0,0067 & 0,0025 & 0 \\ 0,0025 & 0,0009 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0529 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$S_z = E([\theta^{\sim}][\theta^{\sim}]) = E(\theta^{\sim 2}) = 0,0067 \quad (39)$$

O algoritmo de Kalman, descrito por Aguirre (2007), faz a estimativa do estado (\bar{x}) no tempo $k+1$ por meio de um ciclo iterativo de cinco equações conforme o fluxograma abaixo, onde a matriz K é conhecida como ganho de Kalman e P é a matriz de covariância de erro de estimativa.

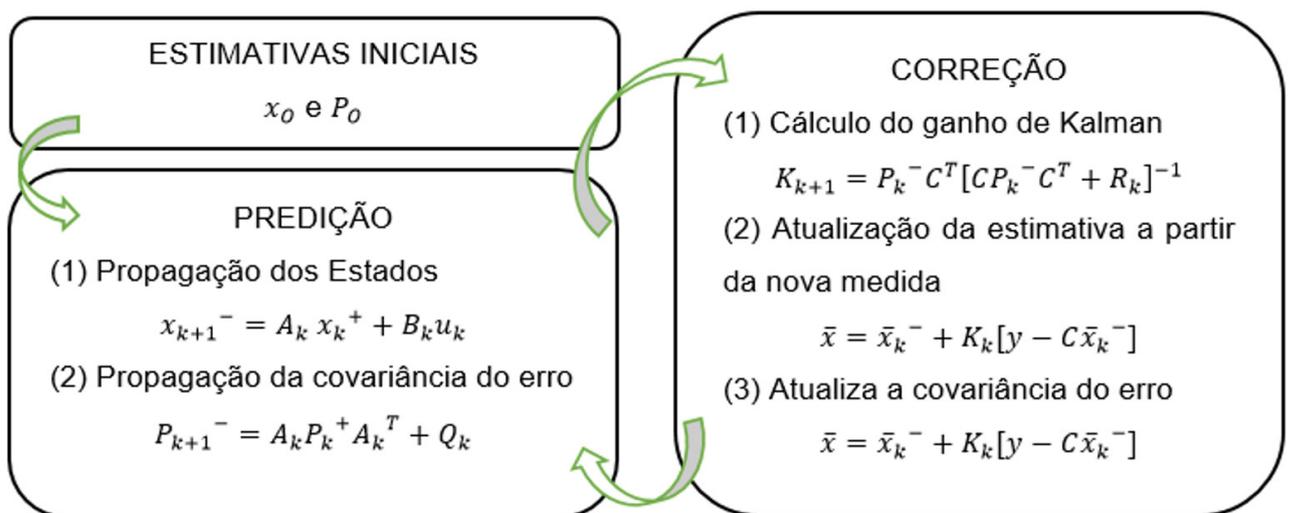


Figura 4 – Ciclo de equações do Filtro de Kalman.

Fonte: Próprio Autor.

9 | RESULTADOS

Por meio do *matlab* foi obtido o mapa de polos e zeros para o sistema desenvolvido na equação (23). Observa-se a presença de um polo do lado direito (8,66) do plano complexo s , o que caracteriza um sistema instável.

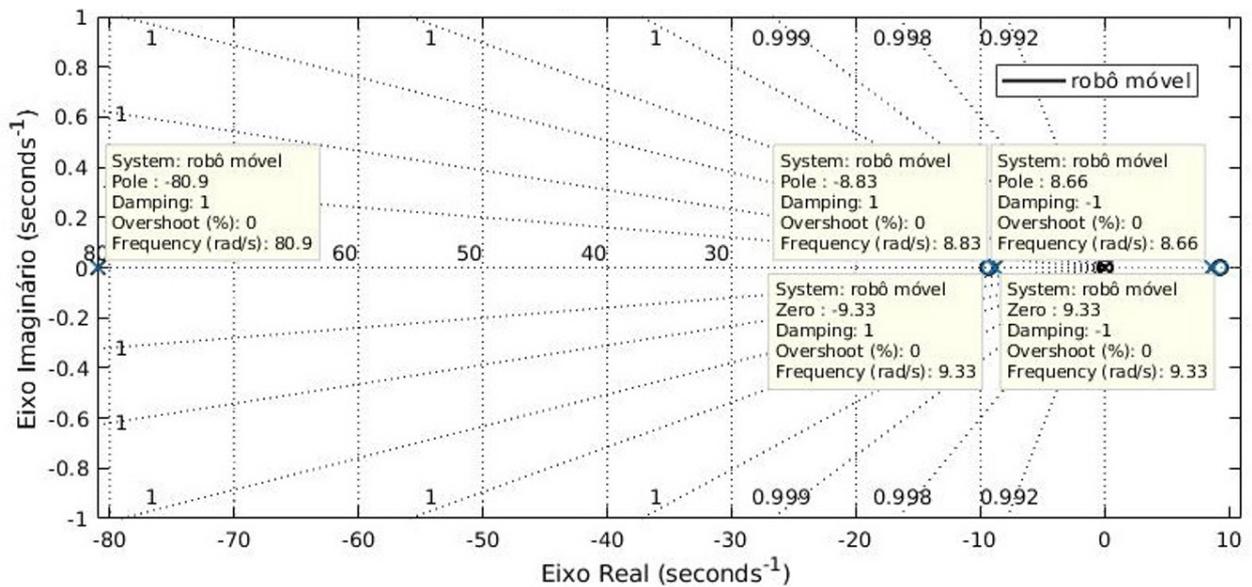


Figura 5 - Mapa de polos e zeros.

Fonte: Próprio autor.

Submetendo o sistema a um impulso unitário, é possível corroborar a instabilidade do sistema.

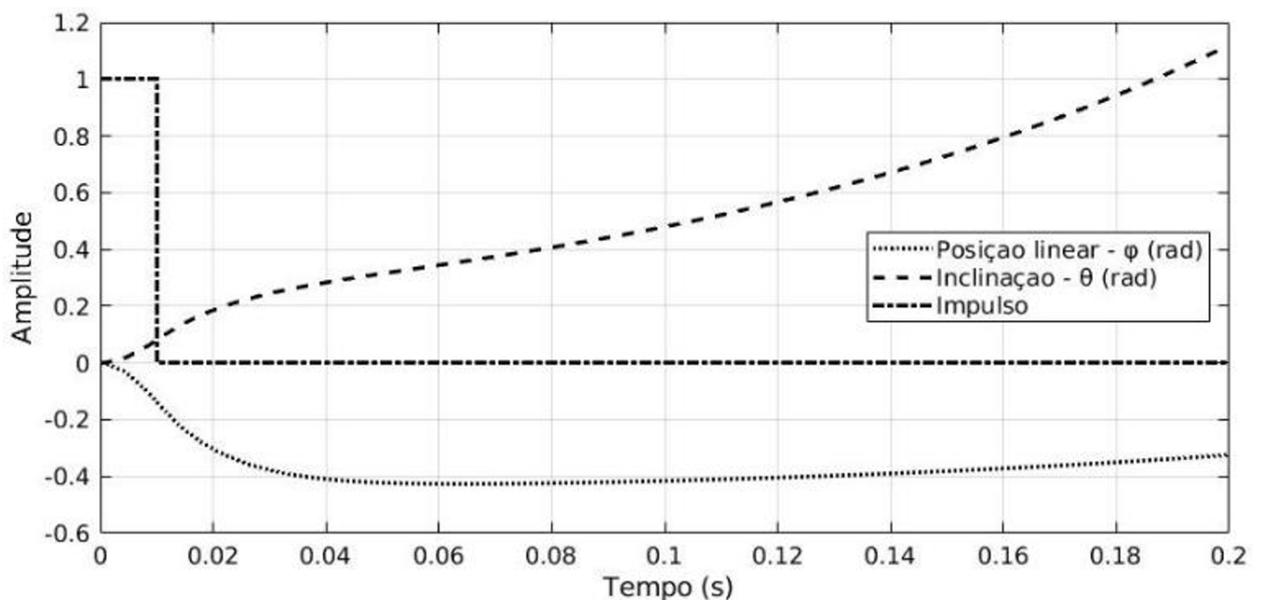


Figura 6 - Resposta natural do sistema ao impulso.

Fonte: Próprio autor.

A matriz de ganho K para o controlador LQR foi obtida considerando as seguintes matrizes Q e R :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = [1] \quad (40)$$

De modo que a função $lqr(A,B,Q,R)$ do *matlab* resulta em:

$$K = [1 \quad 30,5 \quad -0,33 \quad 9,47]$$

O modelo obtido foi testado em ambiente de simulação (*simulink*) considerando a inclinação inicial de 10 graus em relação à vertical. A resposta para a inclinação (θ) e posição (x) está na figura 7.

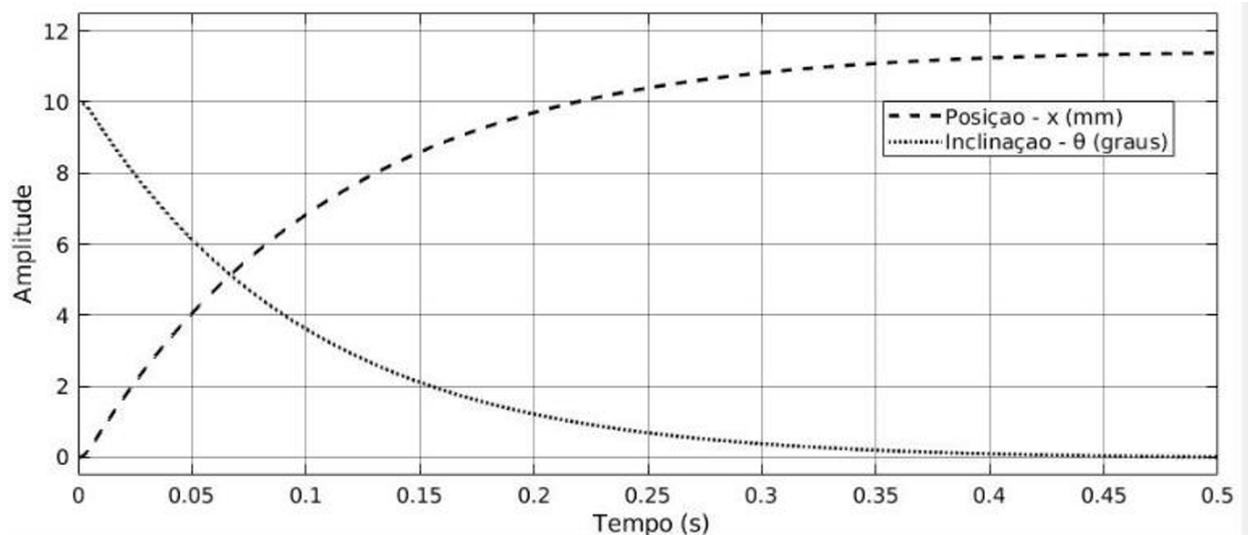


Figura 7 - Comportamento de θ e x .

Fonte: Próprio autor.

Para a implementação do filtro de Kalman, foi utilizado o bloco da interface para comunicação com a IMU conectada a um bloco de Filtro de Kalman fornecido do *simulink*. Foi utilizado o modelo declarado em (32) e (33) e as matrizes de covariância de erro (38) e (39). O gráfico abaixo mostra o ângulo de inclinação estimado e o ângulo de inclinação obtido a partir das medidas do acelerômetro.

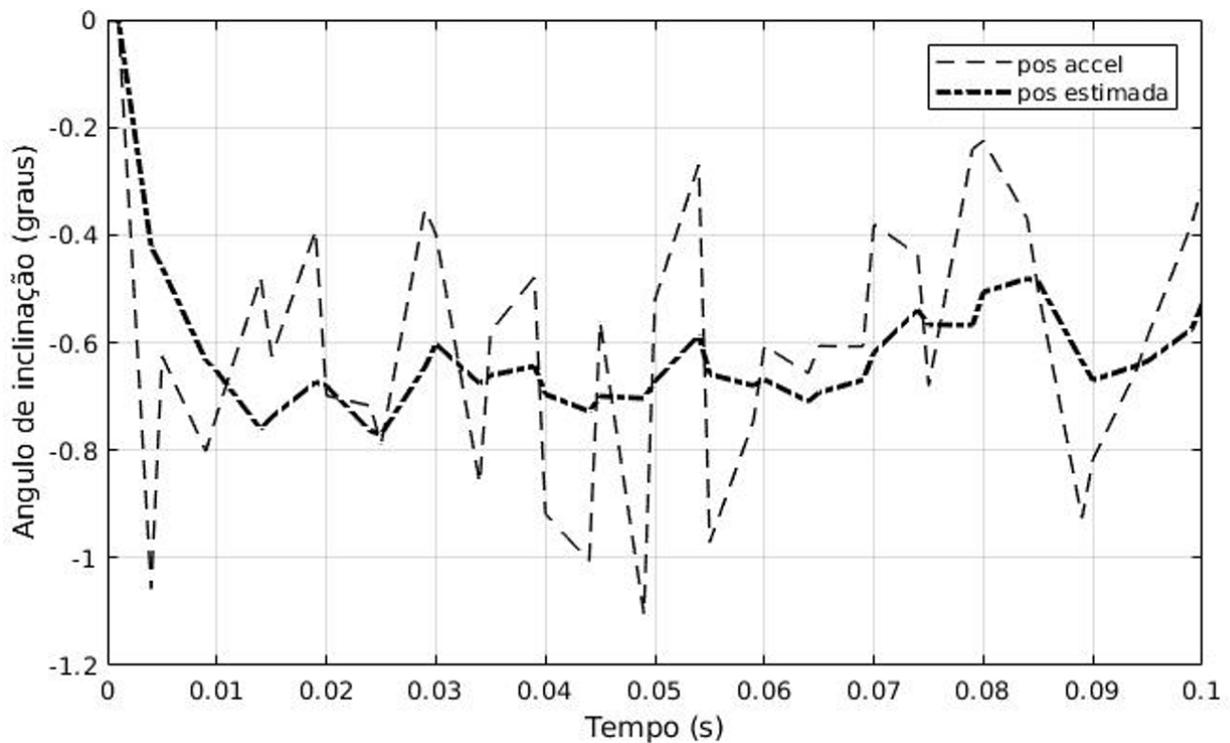


Figura 8: Resposta do filtro de Kalman para o ângulo de inclinação.

Fonte: Próprio autor.

10 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interface desenvolvida no ambiente *simulink* foi capaz de executar as rotinas para leitura e atuação conforme esperado, permitindo obter posição linear por meio dos encoders, ler os sensores inerciais da IMU e acionar os motores CC por meio da ponte H.

A obtenção do modelo dinâmico do robô permitiu obter o gráfico de resposta natural e o mapa de polos e zeros, que comprovam a instabilidade do sistema. A matriz de ganho K obtida com o LQR permitiu estabilizar o sistema sob perturbação em ambiente simulado, validando o modelo utilizado e permitindo a execução de testes em controle na interface desenvolvida.

A implementação do Filtro de Kalman mostrou que pode reduzir os ruídos presentes na medida do ângulo de inclinação, tornando essa medida mais confiável para ser utilizada como realimentação em um sistema de controle.

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, podem ser realizados outros testes de implementação de algoritmo para controle.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas**: técnicas de lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

BOBROW, F. **Controle de um pêndulo invertido com 6 graus de liberdade e rodas de reação**.

Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 14. 2015.

DING, Y.; GAFFORD, J.; KUNIO, M. Modeling, Simulation and Fabrication of a Blancing Robot. **Harvard university, Massachussets Institue of Technology**, n. 151, 2012.

DISTEFANO, J. J.; STUBBERUD, A. R.; WILLIAMS, I. J. **Sistemas de Controle - Coleção Schaum**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

MATHWORKS. **Simulink - Simulation and Model-Based Design**, 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Acesso em: 19 nov 2018.

MAYBECK, P. S. **Stochastic Models, Estimation and Control**. Ohio: Academic Press, 1979.

NIVALDO, A. L. **Mecânica Analítica**. [S.l.]: Livraria da Física, 2004.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson Education Brasil, 2003.

ROBÔ PARA INSTALAÇÃO DE SINALIZADORES AVIFAUNA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 23/03/2020

Bruno Monteiro Costa

Engenheiro Eletricista - ENGEPRO

Máique Bruno de Andrade Rezende

Engenheiro Mecânico - ENGEPRO

Waldir Alves Diniz

Engenheiro Mecânico - ENGEPRO

Ricardo de Souza Marcelo

Técnico Mecânico - ENGEPRO

Clécio Paula da Silva

Engenheiro Eletricista – Grupo TERNA

RESUMO: Estudos realizados demonstram a efetividade da utilização dos sinalizadores anticolisão de aves (sinalizadores avifauna). Ao serem instalados nos cabos para-raios das torres de transmissão que coincidem com as rotas migratórias de determinadas aves, possuem um impacto muito positivo na preservação da fauna nestas regiões. As concessionárias de energia por sua vez, possuem um grande desafio para realizar esta instalação nas linhas já existentes, uma vez que, não é permitido ao eletricista sair no próprio cabo para-raio, bem como variações de relevo não permitem acesso com cestos aéreos além do fato de que o

desejável é que as manobras sejam realizadas em regime de linha energizada. Este artigo tem como objetivo apresentar uma inovadora tecnologia e ferramenta disponível no mercado para instalação de sinalizadores avifauna sem a necessidade de desligamento da linha de transmissão e controlado remotamente.

PALAVRAS-CHAVE: Sinalizador Avifauna, Robô, Proteção, Fauna

ABSTRACT: Studies carried out demonstrate the effectiveness of the bird flight diverters. When installed on overhead conductors of transmission towers that coincide with the migratory routes of certain birds, they have a very positive impact on the preservation of fauna in these regions. The energy concessionaires, in turn, have a great challenge to carry out this installation on the existing lines, since the electrician is not allowed to leave the overhead conductors itself, as well as relief variations do not allow access with aerial baskets beyond the fact that it is desirable for the maneuvers to be carried out in a live work regime. This article aims to present an innovative technology and tool available on the market for installing bird signals without the need to disconnect the transmission line and remotely controlled.

KEYWORDS: Fly-bird-diverter, robot,

1 | INTRODUÇÃO

Estudos realizados demonstram que a utilização dos sinalizadores avifauna (sinalizadores anticolisão de aves) instalados nos cabos para-raio das torres de transmissão [1] que coincidem com as rotas migratórias de determinadas aves, possuem um impacto muito positivo na preservação da fauna nestas regiões. Dentro dos estudos de impacto ambiental realizados para permissão da construção de linhas de transmissão, os órgãos responsáveis têm exigido por parte das concessionárias de energia a realização de estudos para verificação deste impacto das linhas no fluxo migratório de aves. Nas linhas de transmissão já construídas em outrora, o próprio departamento ambiental e/ou consultorias ambientais através de observações e análises em campo determinam seu impacto e tipos de medidas a serem tomadas. Com base nestes estudos, é possível a definição dos locais bem como o tipo do sinalizador avifauna a ser instalado que terá efetividade para um determinado tipo de ave.

As concessionárias de energia por sua vez, possuem um grande desafio para realizar esta instalação nas linhas já existentes, pois para tal, seria necessário realizar o desligamento da mesma uma vez que não é permitido ao eletricitista sair no próprio cabo para-raio para realização da tarefa, causando prejuízo à concessionária afetando seus indicadores junto a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e conseqüentemente o incômodo de seus usuários.

Para tal necessidade iniciou-se o estudo para desenvolvimento de um equipamento que realizasse a instalação dos sinalizadores com a linha energizada sem submeter a vida dos eletricitistas a qualquer risco, bem como a situações que agravam a descida do cabo para-raio ao solo, como vales, travessias de rios e lagos. A partir destes critérios surge o Robô para Instalação de Sinalizadores Avifauna.

2 | APLICABILIDADE

A crescente demanda por energia bem como a reestruturação do sistema interligado nacional (SIN) gera uma necessidade contínua de expansão das linhas de transmissão em todo o território brasileiro.

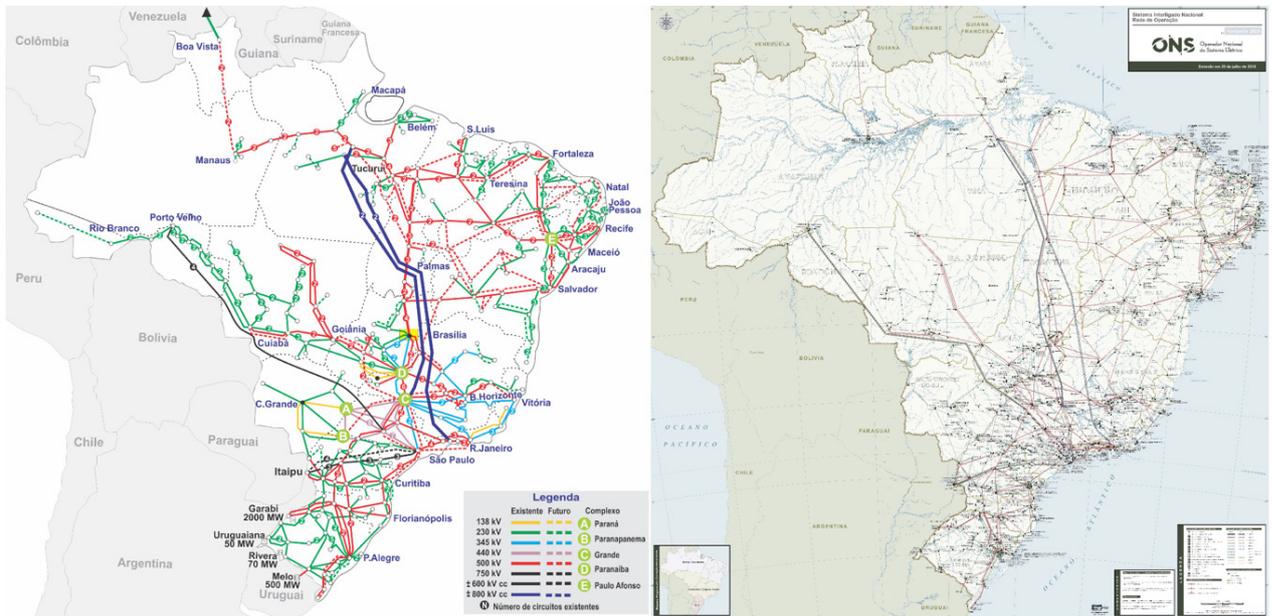


Figura 1: Linhas de transmissão e do SIN horizonte 2023.

Fonte: ONS 2020

Devidos as dimensões continentais de nosso país, uma complexa malha de linhas de transmissão se faz necessária para atendimento da demanda de energia. Como podemos perceber na Figura 1 há muitas linhas planejadas e já em construção para o horizonte de 2024. Com toda esta extensão é possível cruzarmos os dados de algumas aves migratórias em diferentes âmbitos.

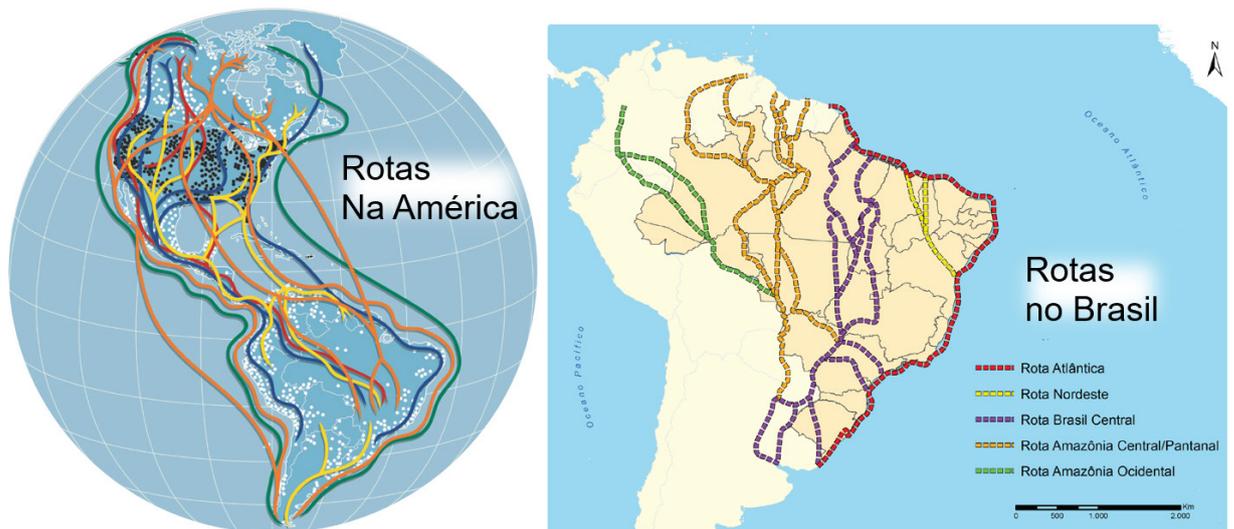


Figura 2: Principais rotas migratórias.

Fonte: Audubon (2018)

Estes mapas identificam principalmente aves que possuem fluxo migratório entre diferentes países.



Figura 3: Sobreposição das linhas e regiões com aves ameaçadas.

Fonte: Autor (2019)

Através da Figura 3 é possível termos uma maior visibilidade com relação a necessidade de utilização dos sinalizadores avifauna. O impacto das torres de transmissão em relação às aves é que durante um vôo alguns destes pássaros não conseguem identificar os cabos e colidem contra os mesmos. Os sinalizadores têm como objetivo propiciar a identificação dos cabos por parte dos pássaros, seja através da imitação de um predador natural ou por uma cor na frequência do espectro visível de uma determinada espécie.

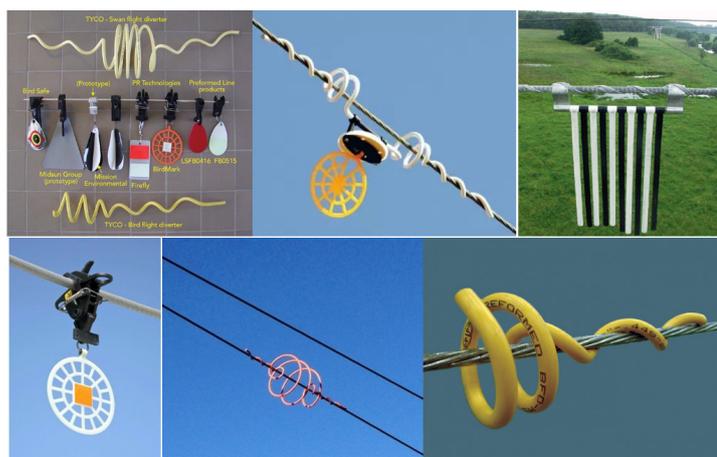


Figura 4: Soluções existentes.

Fonte: Edison Electric Institute (2012)

Devido a diversidade de espécies, diferentes sinalizadores são criados a fim de se obter melhores resultados. Sendo que para muitas aplicações é utilizado um determinado

tipo de sinalizador.

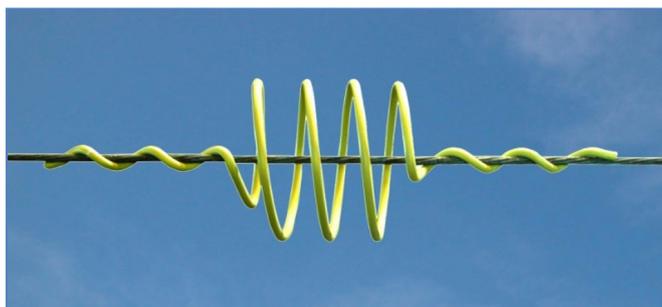


Figura 5: Sinalizador comumente utilizado.

Fonte: Edison Electric Institute (2012)

Através de três modelos de sinalizadores espirais conforme Figura 5, existentes no mercado e que seriam utilizados em um determinado trecho, iniciou-se um grande trabalho de engenharia para determinar inicialmente as funções e características necessárias ao equipamento para que o mesmo pudesse realizar a atividade de instalação deste sinalizador.

3 | CARACTERÍSTICAS DESEJADAS

Devido aos procedimentos para trabalho em linha energizada algumas características e condições de contorno devem ser atendidas para maior conforto e segurança do eletricitista que irá utilizar e operar o equipamento.

- Controlado remotamente;
- Monitorado remotamente;
- Posicionamento do sinalizador no robô por um eletricitista que estará na torre;
- Blindagem da bateria e sistema eletrônico utilizado para evitar qualquer possibilidade de influência do campo eletromagnético no sistema;
- Precisão no deslocamento até o ponto de instalação;
- Giro para enrolamento das pernas do sinalizador ao cabo para-raio;
- Braço articulado para permitir o retorno até a torre;
- Alteração do centro de gravidade;
- Retorno do equipamento até a torre para iniciar o novo processo de instalação do próximo sinalizador;
- O equipamento deverá conter um sistema para resgate em caso de pane eletroeletrônica.

O equipamento deverá se deslocar através do acionamento remoto até o último ponto de instalação, e após concluir o processo, retornar à torre para coletar outro sinalizador a

ser instalado a uma distância determinada da última instalação realizada. Será necessário pelo menos 1 eletricista junto à torre para realizar o posicionamento de cada sinalizador no Robô.

As etapas de subida e descida do equipamento deverão ser estudadas por cada equipe e de acordo com o modelo e tamanho de estrutura a ser realizada sendo que os pontos para içamento devem estar disponíveis de modo a facilitar a manobra e transporte.

Foram realizados diversos testes e criação de diversos protótipos até chegar à concepção de um equipamento que através da junção de um complexo sistema mecânico e eletrônico, seria capaz de realizar a instalação dos sinalizadores.

4 | SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Por um longo período, foram realizados testes em linhas desenergizadas e energizadas com a ajuda de diversas equipes de linha viva. Percebemos e realizamos neste período, diversas melhorias no equipamento a fim de aumentar seu rendimento, eficiência e segurança durante as atividades a serem desenvolvidas. Foi possível identificar que o conceito principal para realizar a instalação funcionou como esperado e que o campo eletromagnético não interferiu na comunicação e rendimento da bateria devido a blindagem criada.



Figura 6: Teste na linha desenergizada - Pires do Rio.

Fonte: Autor 2018



Figura 7: Teste na linha energizada - Porto Primavera.

Fonte: Autor 2018



Figura 8: Teste linha desenergizado - Xingu 800 kV.

Fonte: Autor 2019

Após todas as melhorias encontradas durante os testes realizados, fabricou-se um equipamento em definitivo para trabalho em 52 vãos da primeira linha de feixe expandido com seis condutores do país, sobre a concessão da Paranaíba Transmissora de Energia. O robô é controlado por um operador do solo através de comandos enviados pelo controle remoto. Possui alcance superior a 1km e protocolo de comunicação permitindo que mais de um equipamento possa operar simultaneamente. Um encoder (transdutor rotativo), garante ao operador do controle parar sempre na posição correta para realizar a instalação dos sinalizadores.

Atualmente o equipamento realiza a instalação de 1 sinalizador por vez sendo necessário retornar até a torre para coletar um novo sinalizador que é posicionado no equipamento pelo eletricitista. O equipamento possui uma velocidade média de 70m/min. e o tempo do ciclo de instalação leva aproximadamente 4 minutos.

Na Tabela 1 abaixo é possível identificar algumas características principais do equipamento.

Distância de comunicação via controle remoto	(1100 ± 50) m
Distância de monitoramento por vídeo	(450 ± 50) m
Inclinação máxima	(40 ± 5) °
Velocidade em inclinação de 0°	(70 ± 5) m/min
Ciclo completo de instalação	(4 ± 1) min
Autonomia do robô	(5000 ± 500) m
Autonomia do controle remoto vídeo ativado	(7 ± 1) hr
Autonomia do controle remoto vídeo desativado	(20 ± 1) hr
Tempo de carregamento da bateria	6 hr a 8 hr
Tempo de carregamento do controle remoto	6 hr a 8 hr
Tempo máximo de resposta	<2s
Sistema de segurança contra interferência	Sim
Indicação sonora de erros	Sim
Indicação visual de erros	Sim
Medição da distância percorrida	Sim
Massa com bateria	(45 ± 3) kg

Tabela 1: Principais Características do Equipamento.

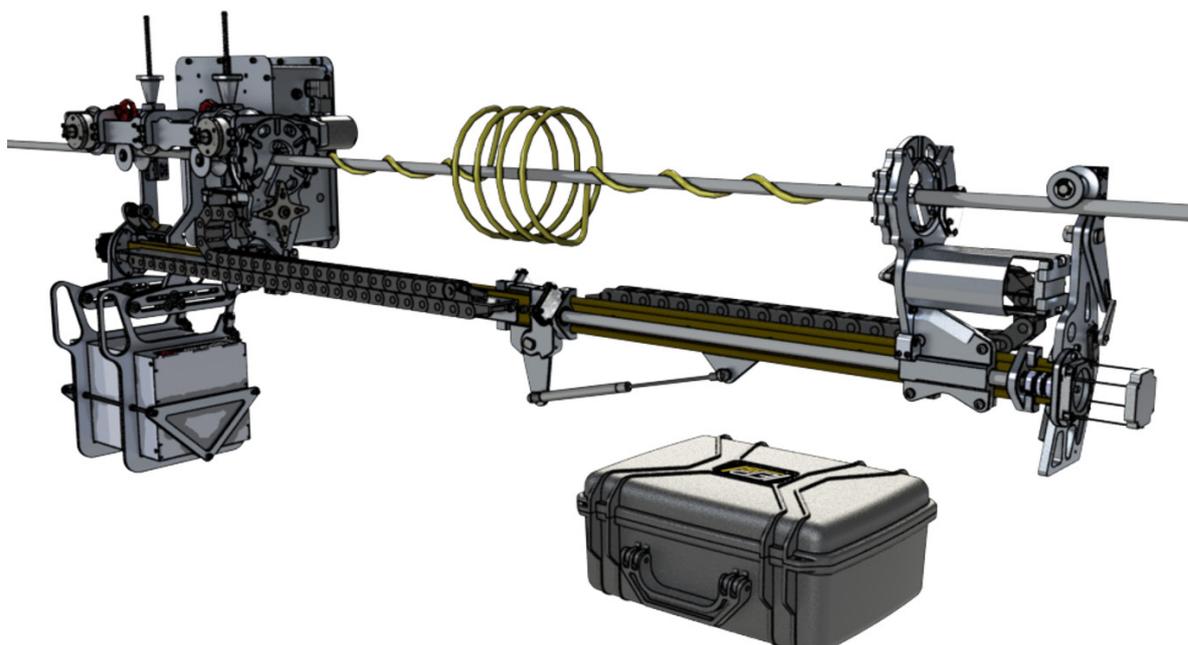


Figura 9: Robô para Instalação de Sinalizadores Avifauna.

Fonte: Autor 2019

5 | CONCLUSÃO

Por meio do desenvolvimento do equipamento, agora é possível realizar o trabalho de instalação de Sinalizadores Avifauna no cabo para-raio à distância por um Robô controlado remotamente do solo. Após diversos testes realizados foi possível verificar sua eficiência e levantar dados para projetar um tempo de trabalho de acordo com a quantidade de sinalizadores a serem instalados e a distância entre estes.

Percebeu-se que esta é uma demanda que vem surgindo de diversas concessionárias

de energia de linhas do país e do exterior. Para tal, outro equipamento está sendo fabricado e em breve estará disponível no mercado para locação do serviço.

Este é um desenvolvimento importante para auxiliar as concessionárias de energia atendendo solicitações de órgãos para preservação da fauna com qualidade, segurança e baixo custo, permitindo fornecimento de eletricidade ininterrupto durante a atividade de instalação de sinalizadores avifauna.

REFERÊNCIAS

- [1] AVIAN POWER LINE INTERACTION COMMITTEE (Eua). Reducing Avian Collisions with Power Lines: The State of the Art in 2012. Washington D.c: Edison Electric Institute, 2012. 184 p.
- [2] BRASIL. Ailton Carneiro de Oliveira. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ed.). RELATÓRIO ANUAL DE ROTAS E ÁREAS DE CONCENTRAÇÃO DE AVES MIGRATÓRIAS NO BRASIL. Cabedelo: Icmbio, 2016. 63 p.
- [3] SUTHERLAND, Peter E.. PRINCIPLES OF ELECTRICAL SAFETY. New Jersey: Ieee, 2015. 407 p.
- [4] NORTON, Robert L.. PROJETO DE MAQUINAS UMA ABORDAGEM INTEGRADA. 4. ed. Massachusetts: Pearson Education, 2013.

PROSPECTOS PARA A EVOLUÇÃO DA INTERFACE HUMANO-COMPUTADOR EM CENTROS DE CONTROLE DE ENERGIA ELÉTRICA

Data de aceite: 01/06/2020

Luiz Corrêa Lima

Nemer Consultoria; Rio de Janeiro, RJ
<http://lattes.cnpq.br/4904248907800865>

RESUMO: Na evolução dos sistemas para centros de controle um desafio constante tem sido o de aperfeiçoamento da capacidade humana com respeito à monitoração e análise de eventos e fenômenos. Propostas recentes têm focado na visualização de eventos multivariados através de gráficos com perspectiva geométrica e gráficos de contorno. Procuramos neste trabalho identificar limitações de visualizações 3D e propomos a utilização conjunta destas com projeções ortogonais 2D, para maior eficácia. Identificamos possibilidades de uso do fator tempo e de técnicas matemáticas para observação sintética da evolução de grande número de grandezas. Sugerimos uma reorganização do espaço de trabalho das consoles de operação segundo uma visão alternativa à provida pelos desktops atuais.

PALAVRAS-CHAVE: Interação Humano-Computador, Interfaces Gráficas, Centros de Controle

PROSPECTS FOR THE EVOLUTION OF THE HUMAN-COMPUTER INTERFACE IN POWER SYSTEM CONTROL CENTERS

ABSTRACT: In the evolution of computer systems for control center application, a continuous challenge has been to improve the human capacity regarding monitoring and analyzing events and phenomena. Recent proposals have focused on the visualization of multivariate events through geometric perspective and contour graphics. We seek to identify limitations of 3D visualizations together with a proposal for the joint use of 3D with 2D orthogonal projections, for greater efficiency. We identify possibilities for using time as a factor and mathematical techniques for the synthetic observation of the evolution of a large number of quantities. We suggest a reorganization of operator consoles workspace according to a vision alternate to the one provided by current desktops.

KEYWORDS: Human-Computer Interaction, Graphical User Interfaces, Control Centers

1 | INTRODUÇÃO

A complexidade da operação de sistemas de energia elétrica tem mostrado um aumento

contínuo ao longo das últimas décadas. Além da complexidade inerente dos fenômenos físicos envolvidos, os conjuntos de dados medidos ou calculados como parte do processo de monitoração e controle têm mostrado crescimento rápido do volume, complexidade e dinâmica, ligados principalmente a novas áreas de aplicação como fontes de energia renováveis (eólicas e fotovoltaicas), intercâmbio de energia entre amplas áreas geográficas e necessidade de consideração de aspectos econômicos na atividade de despacho. Um desafio central é conceber como detectar informações importantes para uma determinada situação e como comunicá-las aos seres humanos de forma adequada para análise e decisão de modo a se garantir um nível consistente de “Consciência Situacional”. Muitas vezes para se contornar a enorme quantidade e variabilidade das informações disponibilizadas utiliza-se um nível de agregação da informação tal que pode levar à observação apenas de fenômenos globais, em detrimento de eventos locais, os quais podem dar origem a grandes distúrbios se não observados e controlados a tempo.

Os sistemas SCADA tradicionais proveem amostragens estáticas de regime permanente das grandezas elétricas do sistema e outra correlatas. Essas amostras têm períodos de varredura típicos de alguns segundos não sendo em geral sincronizadas no tempo, formando fotografias do sistema elétrico potencialmente inconsistentes como no caso de medições analógicas e indicações de topologia. Este problema pode, de certa forma, ser tratado por ferramentas analíticas especializadas já bem conhecidas. A disponibilização de fotografias dos dados que se sobrepõe em sequência na base de dados de um sistema Scada faz com que os recursos tradicionais de Interação HumanoComputador (IHC) sejam desenhados de maneira a utilizar diagramas, gráficos e tabelas com valores que representam somente o estado mais recente do sistema elétrico operado. Para entender a evolução de uma situação operativa de maneira consistente, o operador tem muitas que acompanhar várias leituras seguidas durante um intervalo de tempo significativo.

As grandezas coletadas e calculadas podem ser historiadas em grandes bases de dados próprias para isto. Seu uso mais comum, no entanto, tem sido para a geração de relatórios off-line, ou por aplicativos desenvolvidos de maneira “ad hoc”, de maneira não integrada com a IHC.

Visando a um melhor tratamento do quadro acima, neste trabalho propomos uma forma de exploração do fator tempo nas visualizações e interações providas pela IHC para a melhor utilização da informação disponibilizada pelo Scada e pelas aplicações analíticas.

A par com as fotografias, grandezas selecionadas do Scada podem usualmente ser apresentadas sob a forma de curvas de tendência, mostrando os valores recentes armazenados para estas grandezas. Os recursos utilizados historicamente para este tipo de representação apresentam a informação de maneira bastante detalhada, muitas vezes

com todas as nuances de variação no tempo. Este nível de detalhamento pode dificultar a identificação imediata e precisa pelo operador da tendência de evolução de grande número de grandezas elétricas o que se traduz na prática na redução na quantidade de variáveis que podem ser observadas na prática. Sob este aspecto, neste trabalho propõe-se outro aproveitamento do fator tempo com o desenvolvimento do conceito de “Tendência Sintética” para reduzir a carga cognitiva sobre os operadores por meio de indicações mais resumidas, e ao mesmo tempo melhor interpretáveis da tendência de evolução de grandezas. A rapidez e qualidade da indicação, obtidas pelo uso de tal recurso, permitiriam cobrir um espectro maior de grandezas observadas por parte do operador.

Outra característica das informações trazidas pelo Scada é de serem independentes umas das outras sem verificação inerente de sua coerência ou consistência mútua. A IHC tradicional apresenta os valores desta forma. Atualmente, no entanto, tem sido crescente o interesse pela a disponibilização de recursos de IHC para apresentação conjunta de várias variáveis. Em particular tem havido uma demanda, ainda mal definida, por gráficos tridimensionais (3D). A utilização de gráficos 3D, no entanto, não pode ser entendida como uma parafernália que resolve este problema de apresentações multivariáveis, como tem destacado a literatura. Neste trabalho apresentamos uma análise dos aspectos positivos e das deficiências de gráficos 3D e propomos uma forma de disponibilização e utilização que permite aproveitar melhor o uso desse tipo de gráfico.

Um aspecto da IHC que tem recebido tratamento insuficiente nos sistemas Scada atuais refere-se à configuração do espaço útil dos vídeos das consoles de operação. De consoles segregadas para utilização do sistema de tempo real, nas últimas décadas as consoles passaram a aglutinar uma quantidade enorme de recursos e ferramentas de escritório, sistemas corporativos, sistemas externos de informação, o próprio sistema de tempo-real e ainda ferramentas de produtividade e recursos de comunicação. Esta parafernália de recursos provoca usualmente uma carga cognitiva significativa sobre os operadores, associada à maneira usual como são organizados os desktops comerciais como orientação a ferramentas e documentos. Neste trabalho levanta-se a oportunidade de se buscarem novas formas de organização desses desktops, como foco na atividade executada correntemente pelo operador, de maneira a tornar mais rápida a preparação e mais eficiente o uso dos recursos importantes para o momento.

2 | FATOR TEMPO NA VISUALIZAÇÃO

Com exploração do fator tempo na Interação Humano-Computador, principalmente a partir de disponibilização e visualização de valores históricos recentes de maneira generalizada, a sequência de fotos do SCADA pode ser utilizada para observação de fenômenos dinâmicos de períodos médios de evolução (da ordem de dezenas de segundos). A consideração do fator tempo, como variável independente ou controlada, no

ambiente de operação pode se dar sob diferentes pontos de vista.

Em um primeiro ponto de vista consideram-se as possíveis formas de utilização:

- Como variável de processo, associada a valores adquiridos e historiados;
- Como variável de processo, associada a valores e eventos programados ou previstos;
- Como variável independente para registro e visualização de tendência histórica ou recente de valores individuais;
- Como recurso de interação para visualizações complexas multidimensionais;

Neste trabalho estamos interessados particularmente nas 2 últimas formas, pelo fato de o tempo poder ser manipulado visando uma melhor qualidade da visualização ou uma maior capacidade de extrair informação desta por meio da interação. No nosso ponto de vista o tempo pode ser explorado na visualização de valores históricos ou de tendências de duas maneiras principais:

Primeiramente, como variável independente, permitindo que o usuário comande a visualização da evolução de fenômenos, pela definição de intervalos de observação de interesse, aceleração e desaceleração do tempo de replay, escolha de períodos de amostragem (decimação) diferentes dos obtidos originalmente e ainda que aplique métodos de cálculo (como soma, média, mediana, mínimo, máximo, desvio mínimo, interpolação e extrapolação) sobre a série de dados original.

Em segundo lugar, como recurso de interação, principalmente em análise exploratória de dados multivariados mesmo que não haja necessariamente um eixo do tempo na visualização. Neste caso, o tempo pode ser considerado subjetivo, ou implícito, por se tornar intrínseco à sequência de interação do usuário com o gráfico multidimensional. Exemplo deste caso seria uma análise exploratória de um gráfico de 3 variáveis onde o usuário varia seguidamente apenas uma das dimensões por vez para observar a evolução da correlação entre as outras 2 dimensões para diferentes valores da dimensão sendo variada.

Outro ponto de vista para a utilização do tempo refere-se ao tipo de atividade sendo exercida no momento pelo usuário do sistema de informação da operação.

Para atividades de monitoração, em geral, pode-se considerar que não há oportunidade para exploração de alternativas, de maneira que a IHC deveria prover maior automatismo na consideração do tempo, por exemplo, por meio de animações, apresentações repetitivas e ainda a compactação do comportamento de certas variáveis para remover detalhamento excessivo. Ai se utilizar o tempo neste modo as apresentações tendem a se tornar talvez mais qualitativas que quantitativas.

Atividades de análise, por outro lado, permitem um período tempo maior para a exploração da informação, mesmo que limitado, de maneira que a variável tempo pode ser explorada de maneira mais detalhada e sob total controle do usuário. A observação

tende a ser quantitativa com alto grau de detalhe.

Observam-se então diferentes necessidades de interação para esses dois tipos de atividade.

A cada um desses pontos de vista podem estar associadas diferentes maneiras de manipulação da variável tempo na visualização para monitoração e análise:

- Uso direto, como variável, que é a visualização típica dos gráficos de tendência atuais;
- Uso indireto, como recurso de interação, conforme descrito acima na análise exploratória de dados multivariados;
- Uso como animação acelerada repetitiva, para destaque de fenômenos muito importantes (este ponto não será coberto no presente trabalho);
- Uso para Representação de Tendência Sintética, forma que será detalhada no item a seguir.

3 | REPRESENTAÇÃO SINTÉTICA DE TENDÊNCIA

Uma representação sintética ideal, para fins de redução da carga cognitiva sobre o operador poderia idealmente fazer uso de um número finito e bem definido de gráficos básicos, identificando um conjunto de padrões de evolução facilmente reconhecíveis pelo usuário como normais, problemáticos ou merecedores de atenção.

Como exemplo, alguns padrões de evolução utilizando representações sintéticas são apresentados na FIGURA 1:

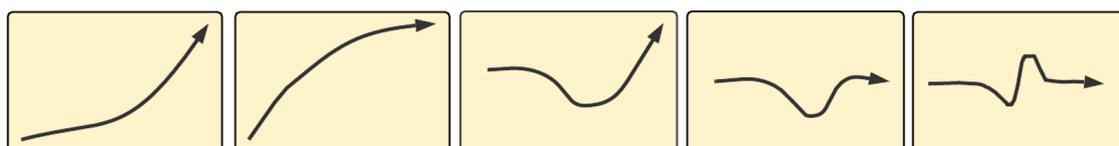


FIGURA 1 – Alguns exemplos de padrões de evolução em representações sintéticas

Na prática, no entanto, não se pode ainda ter segurança de que esta redução a um conjunto muito restrito de representações possa englobar de maneira segura e eficaz todos os padrões importantes de comportamento de grandezas elétricas, o que dá margem a pesquisas e experimentações a esse respeito.

Como alternativa de aplicação mais imediata, propõe-se o uso de representações que permitam remover o detalhe excessivo, mostrando apenas o aspecto geral da evolução recente, em termos qualitativos.

Uma possibilidade de se chegar a este resultado seria fazer uso do conceito de Ajuste de Curvas (“Curve Fitting”) como método de representação. “Curve Fitting” corresponde a um conjunto de métodos matemáticos que objetivam encontrar uma curva que se ajuste

de uma certa maneira a uma série de pontos fornecidos. O ajuste obtido pode depender do atendimento a uma série de parâmetros a serem definidos.

Um exemplo do aspecto final do que se quer representar é mostrado na FIGURA 2. Neste é apresentado um diagrama unifilar de uma subestação e sobre este, pequenos gráficos de tendência sintética representando grandezas elétricas de processo associados a equipamentos elétricos.

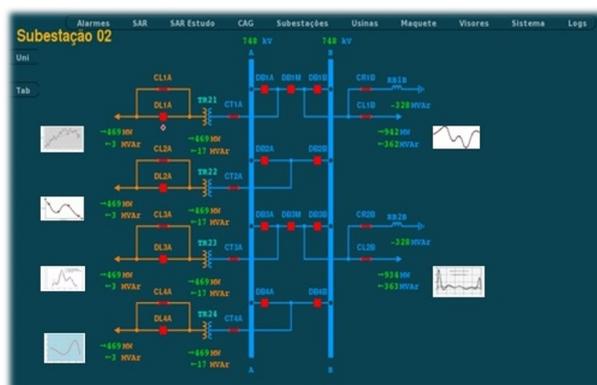


FIGURA 2 – Exemplo de apresentação prática de Tendência Sintética para uma Subestação

O Ajuste de curvas pode envolver Interpolação, onde é feito um ajuste exato aos dados, ou Suavização (“smoothing”) na qual é construída uma função mais “suave” que a obtida por interpolação e que se ajusta aos dados de maneira aproximada. Como exemplo pode-se observar na FIGURA 3 algumas possibilidades de “curve fitting”, onde por meio de diferentes parametrizações do método de ajuste, obtêm-se resultados diversos, onde o primeiro deles pode ser considerado exagerado (“over-fitting”), o segundo não representativo (“under-fitting”) e o terceiro um resultado adequado para uma certa capacidade de observação.

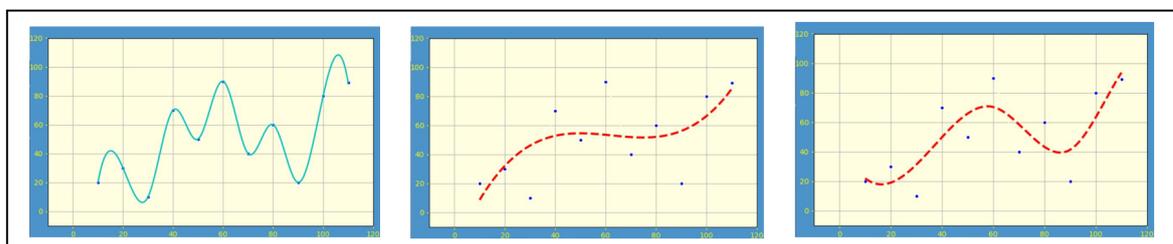


FIGURA 3 – Resultados variados de diferentes parâmetros de “fitting”

Na prática para se trabalhar com “curve fitting”, dentre vários métodos matemáticos possíveis, utiliza-se o conceito de Curva Spline. Uma spline é uma função polinomial definida por partes. Em problemas de interpolação, as curvas spline são preferidas à interpolação polinomial devido à simplicidade de sua construção, facilidade e precisão de avaliação e sua capacidade de aproximar formas complexas por meio de ajuste de

curvas A FIGURA 4 apresenta um exemplo de “curve fitting” com a utilização de splines, onde podem observar os pontos originais de dados, a curva ajustada exatamente nesses pontos e a curva suavizada, obtida por meio de uma spline parametrizada de acordo com o interesse de uso. Pode-se observar que a suavização pode ser utilizada para reduzir a quantidade de informação em uma curva, mantendo a representatividade da tendência de variação.

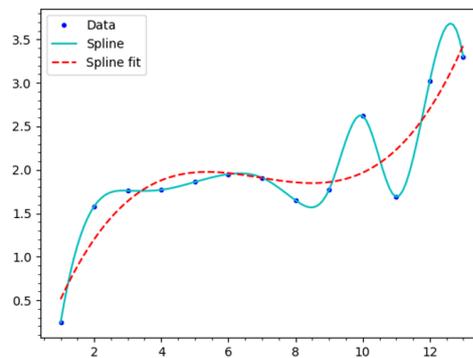


FIGURA 4 – Exemplo de uso de “spline”

O uso prático de splines requer experimentação, principalmente quanto à definição dos parâmetros que definem o grau de suavização pretendido. Estes dependem basicamente da natureza da grandeza representada e do uso final da aplicação, tendo em vista diferentes comportamentos esperados e interesses de observação. Isto demanda experimentação detalhada com diversos tipos de informação e perfis de uso. Um tratamento especial dos pontos extremos do gráfico (uso de múltiplos pontos terminais, ou “end points”) pode ser necessário principalmente quando se deseja uma representação qualitativa mais real das curvaturas dos trechos terminais da curva, principalmente para evitar falsas interpretações de tendência próxima futura.

O recurso de animação combinado com as tendências sintéticas tem um potencial de uso interessante, principalmente para dar um destaque maior a comportamentos anômalos de evolução das grandezas a nível local. Sua parametrização (tempo de desenho, método de dinamização, etc.) deve ser objeto de um estudo mais aprofundado tendo em vista se observar em que condições se este recurso pode ser de real benefício sem provocar um deslocamento indevido da atenção sobre os fenômenos globais.

4 | VISUALIZAÇÃO MULTIVARIÁVEL

A necessidade de observação de fenômenos em ambientes de centros de controle tem feito surgir requisitos de observação de várias variáveis não mais de maneira individual, mas de sua evolução conjunta, de sua correlação.

Esta atividade hoje é tarefa dos operadores, mas torna-se impraticável quando

umenta a quantidade de correlações a serem observadas.

O tratamento de correlações pode ser implementado de várias maneiras, como por exemplo:

- Por simples observação gráfica
- Manipulação gráfica (atividade exploratória)
- Análise por algoritmos e software específico (correlação estatística, séries temporais, aprendizado de máquina, etc)

Neste trabalho estamos interessados mais especificamente nas manipulações gráficas sobre visualizações multivariadas (3D). Apresentamos a seguir algumas considerações sobre o uso deste tipo de gráfico e de sua modelagem visando o seu melhor aproveitamento e o desenvolvimento de ferramentas próprias.

4.1 Visualização 3D

A literatura tem apresentado propostas de novas formas de visualização para sistemas de potência (PSERC, 2008), como diagramas em perspectiva, animação de valores, etc. Dentre essas formas destacam-se superfícies em gráficos 3D, mas com deficiências para uso prático.

Do ponto de vista deste relatório, a evolução desses recursos na direção apoio na capacidade analítica e decisão do usuário final requer uma compreensão adequada das perspectivas e limitação dos gráficos 3D quando comparados ao 2D e consideração apropriada da dimensão de tempo nos ambientes do centro de controle. Esses pontos são apresentados a seguir.

Neste capítulo, uma análise comparativa é feita entre as formas 2D e 3D de visualização, observando os pontos fortes e fracos de cada uma dessas formas. Em seguida, é feita uma proposta para o uso simultâneo e síncrono de visualizações 2D e gráficos 3D, para explorar as melhores capacidades de cada um, em relação a um mesmo fenômeno ou evento que está sendo observado.

As renderizações em 3D foram descritas como a mais recente evolução em tecnologia gráfica e podem criar um ambiente mais realista em termos de atividades de simulação, como se sabe no que diz respeito a simuladores de voo. No entanto, há uma tendência de se considerar o uso de imagens 3D mais para fins estéticos ou de “marketing” (STEWART et al, 2009).

Em alguns casos, um gráfico 3D contém informações sobre três variáveis diferentes, tornando necessária a adição de informações de profundidade para transmitir o significado pretendido. No entanto, em muitos casos, a adição de uma terceira dimensão é puramente estética e não transmite informações significativas sobre as variáveis (ZACKS et al, 1998). Alguns autores identificaram casos em que a renderização 3D pode mesmo afetar negativamente a compreensão de um gráfico (RUSSELL & BIELEWICZ, 2005). Em outros estudos reportados verificou-se que a adição de perspectivas 3D aos gráficos que

representam duas variáveis pode afetar negativamente a precisão e o tempo de reação (BARFIELD et al, 1989).

Em uma pesquisa de campo, Stewart (STEWART et al, 2009) relatou que, quando perguntados sobre suas preferências de gráfico de barras, 95% dos participantes relataram que os gráficos 2D eram mais fáceis de ler. Apesar disso, 71% relataram que o gráfico 3D tinha melhor aparência e 62% que esse gráfico provavelmente seria exibido em um periódico científico.

Os estudos de Barfield (BARFIELD et al, 1989) se concentraram nas diferenças de desempenho entre usuários novatos e experientes. Os participantes novatos produziram respostas mais precisas usando apresentações de gráficos em 2D, enquanto os experientes produziram respostas mais precisas quando fornecidos com gráficos 3D. Além disso, gerentes experientes e novatos ficaram mais confiantes em suas respostas quando forneceram gráficos 2D como auxiliares de decisão.

As visualizações 3D são ambíguas ao longo da linha de visão, assim como as vistas 2D são ambíguas na dimensão ausente. O esboço em vistas com perspectiva 3D também cria distorções de distância e ângulo que dificultam observações numéricas precisas (St. JOHN et al, 2000). Portanto, nenhum desses dois tipos de visualização é melhor sempre. No entanto, acredita-se que as vantagens e limitações são realmente complementares. No final das contas, conclui-se que 3D é melhor para mostrar a forma e 2D é melhor para mostrar a medida.

Outro aspecto problemático da representação 3D é o potencial de interpretação errônea da orientação da curva quando apenas gráficos estáticos estão disponíveis. Se a ferramenta permitir, no entanto, a rotação do gráfico, o problema de interpretação incorreta poderá ser resolvido pela interação adequada do usuário. De qualquer forma, a possibilidade de algumas informações serem mal interpretadas em um ambiente crítico de segurança, como um centro de controle de sistemas de energia, é algo que não é admissível para ser resolvido em tempo real. Deve ser evitado pelo design adequado.

4.2 Espaço e Tempo

Quando consideramos a importância de apresentar dados em mais de duas dimensões, devemos reconhecer o tempo como uma dimensão excepcional que merece tratamento específico. O primeiro ponto de vista ao analisar o tempo nas visualizações é considerar as possibilidades de usar o tempo junto com o espaço. Dix (DIX, 1996) resume 3 usos específicos de tempo na visualização:

- Tempo representando o próprio tempo - como quando vemos a animação de um objeto em movimento. O tempo pode ser manipulado aqui para acelerar a visualização quando comparado ao tempo real, especialmente com fenômenos muito lentos ou para localizar padrões em uma observação.
- Tempo representando mudança em algum parâmetro - permitindo a visualização

de uma dimensão extra. Este é o caso de sucessivas imagens 2D de diferentes seções transversais de um sólido.

- Tempo mapeado na interação - onde há um tempo subjetivo do usuário associado à manipulação de diferentes parâmetros de uma visualização.

O segundo ponto de vista diz respeito às possibilidades de interagir com uma visualização, categorizando as operações básicas no tempo e no espaço. Uma variedade de técnicas individuais tem sido apresentada na literatura para a visualizar dados espaço-temporais, de uma maneira que dificulta que desenvolvedores e usuários selecionem métodos ou ferramentas úteis para seus problemas e domínios específicos.

Bach et al (BACH et al, 2014) apresentaram uma revisão de técnicas de visualização de dados espaço-temporais, descrevendo-as como operações de conjunto realizadas em um cubo conceitual de espaço-tempo. Eles apresentam uma visão sistemática da modelagem da visualização 3D combinando os conceitos de espaço e tempo. Basicamente, o cubo espaço-temporal conceitual possui três eixos: um eixo de tempo e dois eixos ortogonais chamados de eixos de dados. Os eixos de dados formam um plano chamado plano de dados.

Bach et al também introduziram uma taxonomia de operações elementares realizadas com o cubo espaço-temporal como suporte. Essa taxonomia é usada para visualizar e explorar modos pelos quais uma representação tridimensional possa ser combinada com visualizações bidimensionais associadas.

Além disso, os autores apresentam algumas ilustrações de como as operações podem ser usadas para descrever um conjunto de técnicas comuns de visualização estática de dados com base no tempo. As operações comuns são (uma descrição mais completa pode ser encontrada no artigo de Bach (BACH et al, 2014)):

- Corte de tempo - extrair um instantâneo temporal específico do cubo e apresentá-lo em combinação com outras operações, animações ou interações.
- Achatamento de tempo - reduzir o cubo ao longo de seu eixo de tempo mesclando todas as fatias de tempo em uma única imagem 2D. A FIGURA 5 apresenta um exemplo deste tipo de operação.
- Justaposição do Tempo - extrair várias fatias de tempo organizando-as lado a lado, em uma grade.
- Corte de espaço - extrair um corte plano em uma direção ortogonal a um plano de dados.
- Achatamento de Espaço - aplainar o cubo ao longo de uma direção perpendicular a um plano de dados.
- Amostragem - extrair cortes de espaço do cubo, girando essas amostras até que elas fiquem de frente para o observador.

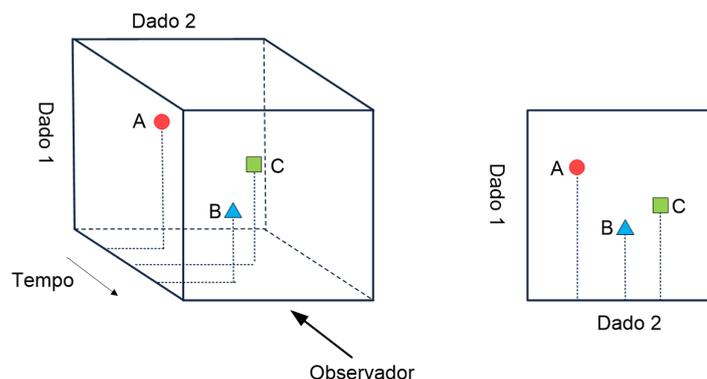


FIGURA 5 - Exemplo de Operação de Achatamento de Tempo com uso do Cubo Espaço-Tempo

Na nossa percepção este framework pode ser usado como base para entendimento e comunicação de ideias entre desenvolvedores, pesquisadores e usuários finais, no que diz respeito às possibilidades de utilização do fator tempo nas visões e interações gráficas. O cubo espaço-tempo constitui uma ferramenta poderosa para análise exploratória de situações operacionais, com particular potencial para uso em visualizações simultâneas sincronizadas de gráficos 3D e suas projeções ortogonais 2D.

Para exemplificar a proposta, a Figura 6 apresenta uma visualização de uma superfície em um gráfico 3D, com as respectivas projeções nos 3 planos. Para uso prático, no entanto estas 3 projeções nos planos seriam colocadas na forma ortogonal para o usuário, de maneira que possa interagir e observar valores quantitativos

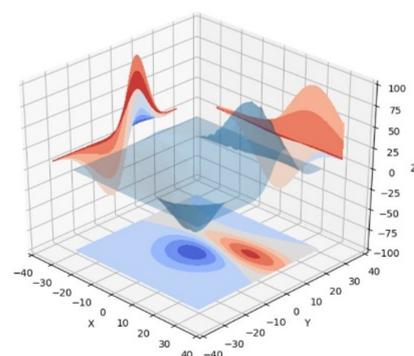


FIGURA 6 - Exemplo de Superfície 3D com respectivas projeções 2D

5 | ORGANIZAÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO (desktops)

Em função da quantidade e variedade de informação disponível na sala de controle para monitoração e tomada de decisão, o operador tem que organizar os seu trabalho ao iniciar cada nova atividade a ser desempenhada ou problema a ser resolvido ao longo do turno, dentre uma parafernália de ferramentas, de fontes de dados, de diferentes sistemas computacionais. Nos desktops atuais diferentes ferramentas, fontes de dados

e documentos são disponibilizados e coexistem nas consoles, mesmo que sem relacionamentos com outros. Ao iniciar uma nova atividade há necessidade de identificar dentro deste conjunto as ferramentas adequadas e localizar os arquivos e documentos pertinentes para o momento, o que acarreta ao usuário uma carga cognitiva de preparação, retardando o esforço e o foco do usuário na atividade de interesse.

A preparação e a execução de uma atividade específica durante o turno requerem, segundo Ravasio (RAVASIO et al, 2004), um conjunto de tarefas subjacentes básicas durante a organização de informações pessoais podem ser divididas em atos de manipulação, categorização, arquivamento e recuperação de informações. Ainda segundo estes autores a metáfora de “desktop” como área de trabalho, que se tornou padrão de fato das interfaces de usuário, nos trouxe problemas novos a serem tratados.

Uma abordagem para se tentar reduzir esta sobrecarga de preparação de ambiente contempla uma nova maneira de se organizarem os recursos disponíveis nos desktops das consoles de operação. O conceito chave é buscar-se um “Desktop Orientado a Atividade”, que poderia ser caracterizado pelos seguintes aspectos:

- O usuário é responsável por declarar o tipo de atividade em que vai se concentrar a partir de um certo momento;
- O Sistema limpa o desktop atual (ícones de ferramentas, links para documentos, aceleradores, barras de tarefas) em determinados vídeos;
- O Sistema disponibiliza somente as ferramentas e aplicativos significativos para a atividade corrente já configurados de maneira específica;
- Sistema organiza ícones no desktop em hierarquias que implementam um fluxo de trabalho e indica os passos deste fluxo;
- Os Documentos aplicáveis são disponibilizados diretamente (por exemplo Instruções de Operação) e algumas janelas de documentos já abertas e posicionadas de acordo;
- Os documentos correlacionados são apresentados de forma agregada com suas eventuais revisões e ajustes (caso típico de Instruções de Operação);
- No caso de recuperação de documentos, suas referências devem utilizar indicadores claros do conteúdo do documento, evitando o recurso a uma nomenclatura (usualmente) padronizada para os nomes de arquivos ou documentos e ainda à navegação em hierarquias de diretórios;
- O Sistema disponibiliza consultas (“queries”) pré-programadas ou implementa restrições implícitas nas futuras consultas para prover um maior foco na atividade corrente na produção de resultados das pesquisas;
- O Sistema segue disponibilizando janelas, ferramentas e documentos de acordo com a evolução do fluxo de trabalho previsto.

Um Desktop Orientado a Atividade poderia coexistir com desktops tradicionais (em monitores diferentes) para permitir ao operador o foco em uma atividade, enquanto acompanha outras visualizações em paralelo.

6 | CONCLUSÃO

Este estudo identificou algumas oportunidades para o uso de representações gráficas juntamente com facilidades de interação como promotores de capacidade de análise e decisão de usuários finais no domínio dos Centros de Controle. Identificamos características básicas, vantagens e deficiências de algumas propostas de visualização, juntamente com estruturas conceituais para fundamentar o desenvolvimento de novas ferramentas. Analisamos diferentes possibilidades de usar o tempo como recurso nas visões e interações. Observamos possibilidades desse uso direta e indiretamente em atividades tanto de monitoração como de análise exploratória, em particular com o emprego de visualizações 2D e 3D simultâneas e sincronizadas. Propomos nova forma de representação gráfica com aparente potencial de aplicação, relacionada à representação de tendência sintética baseada em ajuste de curvas e uso de curvas “spline”. Esperamos que o conjunto de conhecimentos apresentados neste trabalho possa contribuir para a evolução dos métodos e ferramentas de visualização no domínio dos Centro de Controle e áreas afins, contribuindo para melhorar o nível de Consciência Situacional na Operação de Sistemas de Potência.

REFERÊNCIAS

BACH, B., DRAGICEVIC, P., ARCHAMBAULT, D., HURTER, C., CARPENDALE, S., “**A Review of Temporal Data Visualizations Based on Space-Time Cube Operations**”, Eurographics Conference on Visualization (EuroVis), STAR – State of The Art Report, 2014.

BARFIELD, W., ROBLESS, R., “**The effects of two- or three-dimensional graphics on the problem-solving performance of experienced and novice decision makers**”, in Behaviour & Information Technology, Volume 8, Issue 5, pages 369-385, 1989

DIX, A., “**Time, space and interaction**”, Proc. of FADIVA 3, 1996, Gubbio, Italy, University of Rome, pp 99-103, disponível em <http://www.comp.lancs.ac.uk/computing/users/dixa/papers/FADIVA/>

PSERC - POWER SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH CENTER, “**Effective Power System Control Center Visualization – Final Project Report**”, PSERC Document 08-12, Urbana-Champaign, USA, May 2008.

RAVASIO, P., SCHAR, S., KRUEGER, H., “**In Pursuit of Desktop Evolution: User Problems and Practices with Modern Desktop Systems**”, ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 11, No. 2, June 2004, Pages 156–180.

RUSSELL, A., BIELEWICZ, J., “**2D vs. 3D Graphing Styles: A Comparison of the Accuracy of Reader Perceptions for 2D vs. 3D Graphs**”, Poster Presented at the 33rd Annual Western Pennsylvania Undergraduate Psychology Conference. Pittsburgh, PA, April 2005.

St. JOHN, M., SMALLMAN, H. S., COWEN, M., “**Designing for the task: Sometimes 2D is just plane better**”. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 44th Annual Meeting. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, 2000.

STEWART, B., CIPOLLA, J., BEST, I., “**Extraneous information and graph comprehension**”, Campus-Wide Information Systems, Vol. 26, pp. 191–200, 2009

ZACKS, J., Levy, E., TVERSKY, B, SCHIANO, D., “**Reading bar graphs: effects of extraneous depth cues and graphical context**”, Journal of Experimental Psychology: Applied, Vol. 4 No. 2, pp. 119-38, 1998.

PROJETO CANAÃ - IRRIGADOR AUTOMÁTICO PARA O AGRONEGÓCIO

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 22/05/2020

André Kroupa

Departamento de Engenharia, Faculdades
Metropolitanas Unidas – FMU
bolakrp@yahoo.com.br

Eldon Moura

Departamento de Engenharia, Faculdades
Metropolitanas Unidas – FMU
eldon.moura@gmail.com

Cláudio Matheus da Costa Comin

Departamento de Engenharia, Faculdades
Metropolitanas Unidas – FMU
claudiocostacomim@gmail.com

Rogério Luis Spagnolo da Silva

Departamento de Engenharia, Faculdades
Metropolitanas Unidas – FMU Professor nos
cursos de Engenharia Elétrica e de Controle e
Automação
rogerio.spagnolo@fmu.br

RESUMO: Em decorrência da falta de chuvas na região do Nordeste, o cultivo de plantações nesta região enfrenta algumas dificuldades em decorrência da qualidade do solo, que impossibilita a agricultura nessa região. O projeto visa atender essa região, com um sistema eletroeletrônico de irrigação

automatizado, que possibilita realizar o controle desse sistema, e ainda, supervisionar por celulares e/ou tablets as grandezas físicas que estão sendo manipuladas.

Para a população que vive nas regiões desfavoráveis para cultivo, este projeto oferece a possibilidade de realizar tal tarefa. A região Nordeste possui uma grande quantidade de água salinizada em poços e açudes inativos, ou seja, realizando o tratamento dessa água, utilizando membranas de osmose reversa para dessalinização, poderá ser utilizado essas águas para irrigação de plantações.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação, Osmose e Controle.

CANAÃ PROJECT - AUTOMATIC IRRIGATOR FOR AGRIBUSINESS

ABSTRACT: Due to the lack of rainfall in the Northeast region, the cultivation of plantations in this region faces some difficulties due to soil quality, which makes agriculture in this region impossible.

The project aims to serve this region, with an automated electro-electronic irrigation system, which makes it possible to control this system, and also to supervise by mobile phones and / or tablets the physical quantities being

manipulated.

For the population living in unfavorable areas for cultivation, this project offers the possibility of accomplishing this task. The Northeast region has a large amount of salinized water in inactive wells and dams, that is, by performing the treatment of this water, using reverse osmosis membranes for desalination, these waters can be used for irrigation of crops.

KEYWORDS: Irrigation, Osmosis and Control.

1 | INTRODUÇÃO

O projeto consiste no desenvolvimento de um protótipo de um sistema automatizado de irrigação para a população que vive da agricultura familiar em pequenas áreas rurais em regiões semiáridas do Brasil (Nordeste), com pouco volume de chuvas, e com recurso hídrico inapropriado para o plantio (água salobra).

O protótipo atua na dessalinização de águas salobras provenientes de lençóis freáticos contaminados por sais minerais oriundos do ciclo hidrológico, muito frequentes no semiárido do nordeste brasileiro, e para isso, é utilizado o método por osmose reversa¹.

Segundo MOURA *et al.* (2008), esse método consiste na passagem de água pressurizada por uma membrana permeável, que é responsável pela retenção de partículas sólidas e sais minerais presentes na água, fazendo com que essa água saia do processo com qualidade para irrigação de plantações.

Além do processo de filtragem, a implementação de um sistema supervisorio é fundamental para análise do processo de irrigação e monitoramento da água e do solo, utilizando sensores, que são responsáveis pelas medições das grandezas físicas/químicas e dos acionamentos eletroeletrônicos, além do envio de informações gerais do sistema. É um diferencial no projeto a utilização de dispositivos portáteis (smartphones e tablets) para o controle do sistema, pelo usuário, por um aplicativo específico.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para o projeto foi desenvolvido um sistema de filtragem e irrigação automatizado utilizando um processo de dessalinização por osmose reversa (bomba d'água + membrana semipermeável) e irrigação localizada por aspersão (mangueiras e válvulas).

Para o monitoramento das grandezas físicas controladas pelo protótipo foram utilizados sensores de temperatura, pH e umidade para solo. O sistema de controle e coleta de dados é realizado pelo microcontrolador, para integração de sensores com módulo sem fio, para transferência de dados para uma IHM². A ideia é ter uma plataforma que permite a conexão de objetos e sensores, a fim de interligá-los em sistemas controlados

1 Osmose Reversa: Processo de filtragem que consiste na passagem de água pressurizada por uma membrana capaz de reter resíduos sólidos, incluindo microrganismos.

2 IHM: Interface Homem Máquina e/ou Interface Humano Máquina

à distância.

2.1 Microcontrolador

Para o projeto do Irrigador Automático para uso rural foi utilizado um microcontrolador modelo ATmega 2560, da fabricante Atmel/Microchip, instalado em um drive de periféricos de entradas e saídas em um emplacement do Arduino Mega.

A seguir, são apresentadas as principais características do ATmega 2560 na **Tabela 1**:

DEVICE	FLASH	EEPROM	RAM	GENERAL PURPOSE I/O PINS	16 BITS RESOLUTION PWM CHANNELS	SERIAL USART'S	ADC CHANNELS
ATmega2560	256 kB	4 kB	8 kB	86	12	4	16

Tabela 1 – Microcontrolador ATmega 2560

Fonte: Datasheet ATMEL, 2019.

A **Figura 1** ilustra o modelo utilizado:

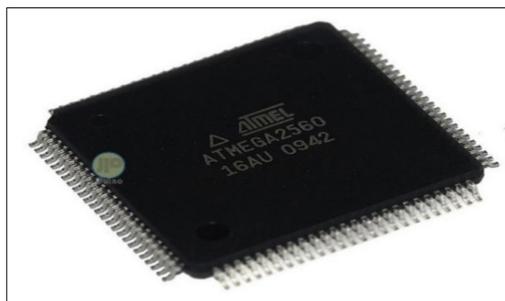


Figura 1 - Microcontrolador ATmega 2560

Fonte: Datasheet Atmel, 2019.

Disponível em: <microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_Summary.pdf>. Acesso em 01/10/2019.

Para programação na plataforma Arduino, o software Arduino IDE com linguagem de programação em C++ é utilizado no desenvolvimento do software aplicativo do protótipo. Na **Figura 2**, encontra-se o hardware utilizado para o projeto:

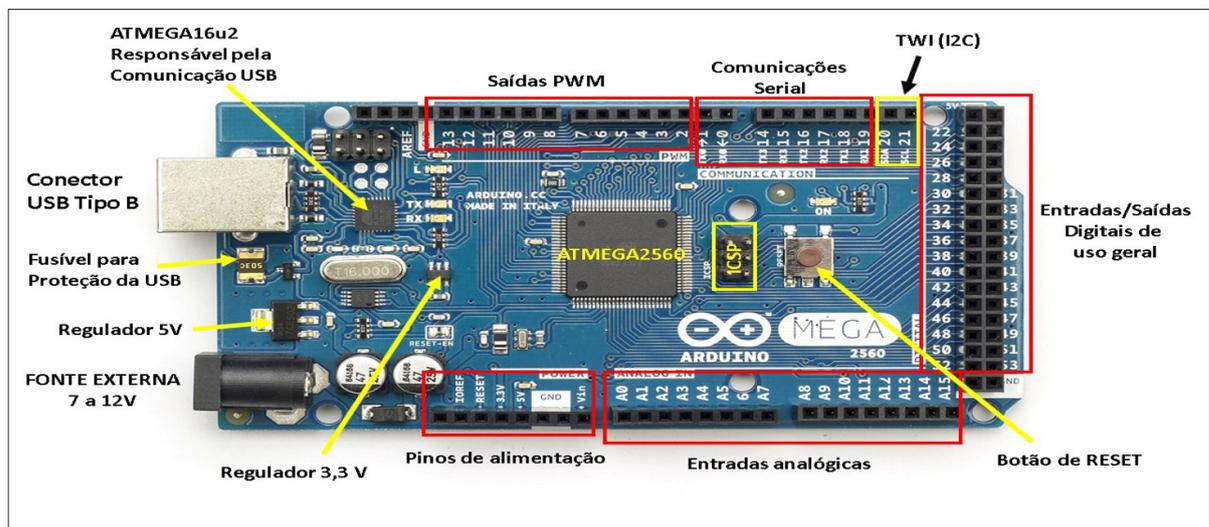


Figura 2 - Arduino Mega 2560
 Fonte: Embarcados.com.br, 2019.
 Disponível em: <embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>. Acesso em 01/10/2019.

2.2 Membrana de Osmose Reversa

Segundo Carvalho *et al.* (2001), os processos de separação por membranas (PSM) são empregados em uma vasta gama de aplicações que vão desde a indústria de alimentos, médica, biológica e farmacêutica, as membranas semipermeáveis são os componentes base no desenvolvimento destas tecnologias, como no caso da osmose reversa, que é um PSM empregado em larga escala pelo mundo na resolução de problemas nas áreas de dessalinização, no reuso e tratamento de águas. Com a evolução tecnológica das membranas semipermeáveis foi possível que elas surgissem como alternativa para o combate a escassez de água mundial, empregadas em larga escala em indústrias de dessalinização, como no caso de Israel que conseguiu amenizar seu problema de abastecimento a partir da implantação de uma usina dessalinizadora em seu litoral localizada na região norte na cidade de Hadera (Israel), esta captura água do mar mediterrâneo e tem capacidade de gerar por osmose reversa um total de 127 milhões de metros cúbicos por ano, quantidades esta tida como suficiente para atender um sexto da população total de Israel, este é um volume consideravelmente grande para uma tecnologia que ainda está se aprimorando devido a algumas limitações técnicas de seu uso.

A construção das membranas utilizadas para o fim de osmose reversa envolve o emprego de tecnologia de ponta, pois são construídas por películas de material muito delgado, necessitando de uma indústria especializada e bem paramentada para sua execução.

Como mencionado por Carvalho *et al.* (2001), as membranas comerciais de osmose reversa são construídas a partir de polímeros, tais como o acetato de celulose e a poliamida aromática hidrizada. Os poros da “pele” têm diâmetros que geralmente variam entre 0,5 e 10 nanômetros. Estes poros influenciam diretamente a rejeição e a permeabilidade da

membrana uma vez que, quanto menor o poro maior será a capacidade de retenção dos sais dissolvidos, em contrapartida a permeabilidade da membrana que é a capacidade de solvente transpassá-la terá um decréscimo substancial em relação as de maior diâmetro dos poros.

Assim a escolha da membrana terá impacto direto na projeção do volume útil de solvente (água) e na taxa de eliminação de sais dissolvidos a partir do soluto a ser tratado através do processo de dessalinização por osmose reversa. É válido citar ainda que, existe uma classe de filtragem para as membranas, conforme é demonstrado na **Tabela 2**:

Característica	Membrana	Porosidade	Material retido
Porosa	Microfiltração	0,1 μ m - 10 μ m	Bactérias e sólidos suspensos
	Ultrafiltração	0,001 μ m - 0,05 μ m	Vírus e coloides
Não Porosa	Nanofiltração	0,001 μ m	Íons bivalente, moléculas orgânicas e pesticidas
	Osmose reversa	<0,001 μ m	Íons, praticamente toda a matéria orgânica. Poder de filtragem de 99% (Gases dissolvidos como CO ₂ e O ₂ não são removidos).

Tabela 2 – Sistemas de filtragem por membrana

Fonte: Muniz *et al.* (2015, p. 19) - Dessalinizador Portátil de Uso Residencial.

Existem dois tipos de membrana, as porosas e as não porosas. Utilizaremos a não porosa, pois a membrana de osmose reversa se enquadra nessa categoria, além desta membrana, a membrana de nanofiltração também é do tipo não poroso, já as de microfiltração e as de ultrafiltração são membranas do tipo porosa.

A apenas uma diferença entre os tipos de membranas, enquanto as membranas porosas possuem apenas o tecido e camada porosa, as membranas não porosas também possuem essas camadas, juntamente com um filme não-poroso, que auxilia na filtragem de resíduos menores.

Para obter uma filtragem eficaz, a água deve passar pressurizada pela membrana de osmose reversa. A bomba utilizada no protótipo é ilustrada pela **Figura 3**:



Figura 3 - Bomba pressurizadora para Osmose Reversa (100 GPD)

A **Figura 4** demonstra o modelo da membrana de osmose reversa utilizada para o projeto:



Figura 4 - Membrana de Osmose Reversa

Fonte: Canature, 2019.

Disponível em: <canature-global.com/npd-series/r-86.html>. Acesso em 01/10/2019.

2.3 2.3 Irrigação

Os diferentes métodos e sistemas de irrigação são subdivididos conforme a **Tabela 3**:

Métodos	Sistemas
Superfície	Sulcos e Inundação
Aspersão	Convencional e Mecanizada (Pivô e Carretel)
Localizada	Gotejamento e Microaspersão
Subsuperfície	Gotejamento Subterrâneo, Elevação do Lençol Freático e Mesas de Subirrigação

Tabela 3 - Métodos e Sistemas de Irrigação

Fonte: Roberto Testezlaf (2017, p. 17), Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações.

No projeto foi utilizado o método de irrigação por aspersão, neste método, a água é distribuída na forma de gotas sobre a cultura e superfície do solo, imitando o efeito da chuva. A formação das gotas é obtida pela passagem da água pressurizada através de orifícios existentes em dispositivos mecânicos chamados aspersores ou *sprays*.

O sistema que é utilizado para o projeto é o convencional, ou seja, as estruturas são fixadas em determinada área para irrigação, conforme na **Figura 5**.



Figura 5 - Sistema de Irrigação por aspersão convencional

Fonte: Aprenda Fácil Editora, 2019.

Disponível em: <afe.com.br/artigos/como-funciona-o-sistema-de-irrigacao-por-aspersao-convencional>. Acesso em 01/10/2019.

2.4 Sensor de Temperatura

Os sensores de temperatura são dispositivos que ajudam a identificar o nível de aquecimento de um determinado equipamento ou processo com o objetivo de fazer com que este permaneça em condições adequadas para o seu funcionamento.

O sensor utilizado para o projeto foi o DS18B20, o componente demonstrado na **Figura 6** pode medir temperaturas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma precisão de cerca de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na faixa de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, ideal para verificar as condições climáticas do local onde o Irrigador Automático para Uso Rural for instalado.



Figura 6 - Sensor de Temperatura DS18B20

Fonte: Datasheet, 2019.

Disponível em: <datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em 14/10/2019.

2.5 Sensor de pH

Dispositivo responsável pela medição do pH (potencial hidrogeniônico) da água que é utilizada para irrigação. Para o projeto, é utilizado o modelo PH-4502C, conforme ilustrado a seguir, na **Figura 7**.



Figura 7 - Sensor PH-4502C

Fonte: Datasheet, 2019.

Disponível em: <usinainfo.com.br/index.php?controller=attachment&id_attachment=553>. Acesso em 01/10/2019.

2.6 Sensor de Umidade para Solo

Componente responsável em medir a umidade do solo, para o projeto, é utilizado o modelo YL-69, ilustrado na **Figura 8**, dessa forma, teremos um controle preciso para sabermos o tempo suficiente para realizar irrigação que não comprometa as plantações.

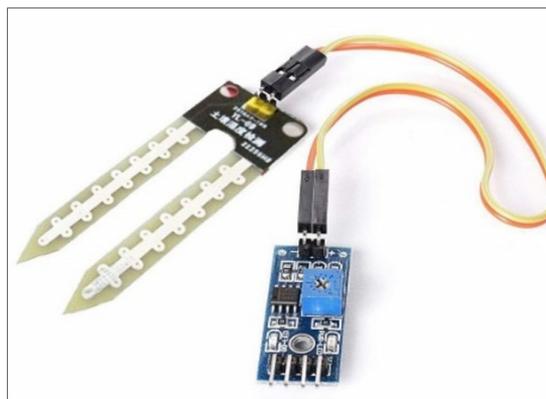


Figura 8 - Sensor de Umidade YL-69

Fonte: Datasheet, 2019.

Disponível em: <hackeduca.com.br/fc-28-yl-38-yl-69-sensor-de-umidade-higrometro-sensor-de-solo/>. Acesso em 01/10/2019.

3 | INTERFACE HOMEM-MÁQUINA (IHM)

A Interface Homem Máquina e/ou Humano Máquina é responsável por demonstrar o estado físico que o equipamento se encontra para o seu operador, e também, possibilitar que o mesmo realize parametrizações de acordo com a sua necessidade.

No projeto, teremos a IHM local, que é composta por um LCD e por botões de comando, e a IHM via tablet, computador e/ou celular, dessa forma, o operador visualiza os parâmetros físicos do equipamento, e realiza acionamentos à distância. Para essas funções utilizamos o aplicativo personalizável Blynk, que faz o controle de hardware remotamente, além de reportar dados dos sensores ao aplicativo.

Com isso podemos ter uma base de dados, registrada ao longo do tempo, com informações importantes como variações de temperatura, umidade do solo e pH da água. Pode-se visualizar na **Figura 9** a IHM local do protótipo:

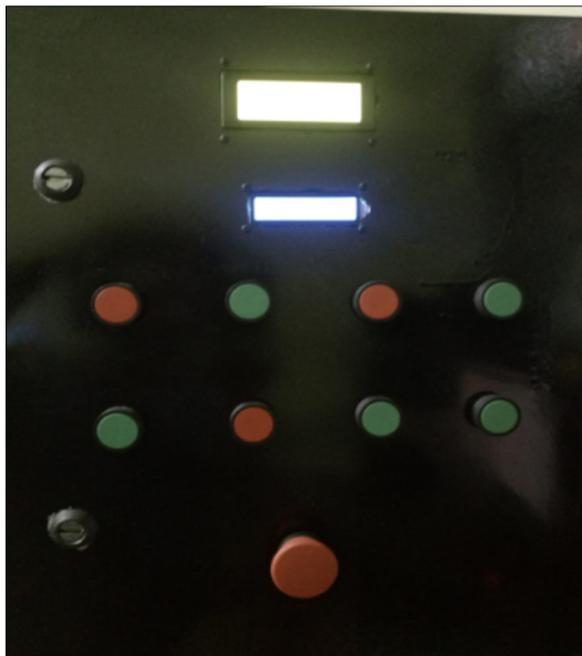


Figura 9 - IHM local

Fonte: Próprio autor, 2019.

Na **Figura 10**, podemos visualizar a IHM remota, que por aplicativo, pode ser instalado em *tablets* e/ou *smartphones*.



Figura 10 – Aplicação Remota

Fonte: Próprio autor, 2019

4 | RESULTADOS

Os resultados obtidos durante as simulações e o funcionamento do protótipo estão descritos a seguir:

A água salobra (com resíduos sólidos de 0,005ppm até 0,3ppm), é bombeada da fonte até o filtro, onde se encontra a membrana de Osmose Reversa. O conjunto bomba + filtro tem capacidade de filtrar até 100 GPD (galões por dia), ou seja, 380 litros/dia, aproximadamente.

A água passa pela membrana de Osmose Reversa, eliminando até 99,1% dos sólidos presentes na água (sais minerais). Após a filtragem, a água deve estar com salinidade igual ou abaixo dos 0,005ppm (equivalente à 0,5% do total líquido). O nível de pH também sofre alterações devido aos sais encontrados na solução, devendo estar neutro ao fim do processo de filtragem. Caso esteja ácido ou alcalino, além do limite aceitável para o plantio, a água deverá ser tratada para evitar problemas de desenvolvimento das plantas. Essa escala é ilustrada conforme a **Figura 11**:

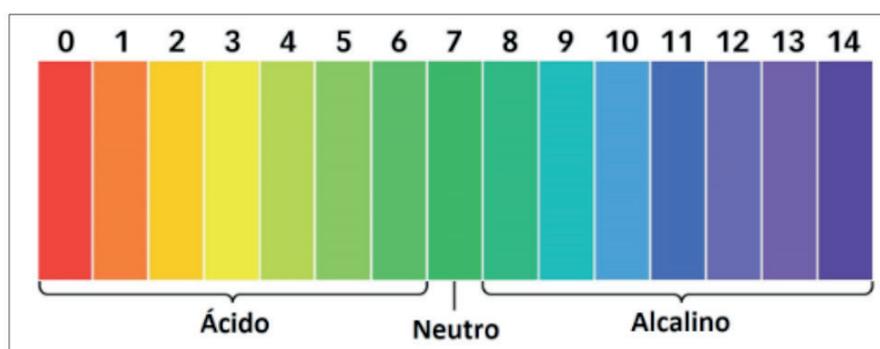


Figura 11 - Escala de pH da água

Fonte: Acqua Nativa Monitoramento Ambiental, 2019.

Disponível em: <acquanativa.com.br/aplicacoes/medidor-de-ph.html>. Acesso em 19/11/2019.

Os controles de temperatura (solo e ambiente), umidade (solo e ambiente), iluminação e análise de pH têm seus parâmetros definidos pelo usuário de acordo com o tipo de cultivo escolhido. Os alarmes/acionamentos são configurados conforme as características do plantio, alterando os valores para acionar ou desligar as cargas de acordo com limites estabelecidos no app de controle (Blynk).

No controle de temperatura, se determinada planta necessita de uma temperatura entre 22°C e 24°C, o sistema permanecerá com as cargas de aquecimento e resfriamento desligadas (climatização) caso as condições estejam favoráveis. Caso a temperatura ultrapasse o limite máximo, a carga de resfriamento será acionada automaticamente (coolers) e desligadas assim que o limite retorne ao normal. O mesmo ocorre caso a

temperatura caia para além do limite mínimo, quando o sistema de aquecimento será ativado (lâmpada para simular uma resistência).

O sistema de irrigação é parametrizado pelo usuário de acordo com a técnica necessária. Algumas plantas necessitam de mais água no processo inicial (gemas), outras utilizam mais água no desenvolvimento das raízes e outras para o desenvolvimento externo, até a maturação da planta. Com isso podemos estabelecer parâmetros de período e vazão, ou ativar o controle de acordo com os limites estabelecidos na leitura dos sensores de umidade.

Na **Figura 12**, encontra-se o protótipo finalizado:



Figura 12 – Protótipo

Fonte: Próprio autor, 2019.

O fluxograma do processo está exposto na **Figura 13**.

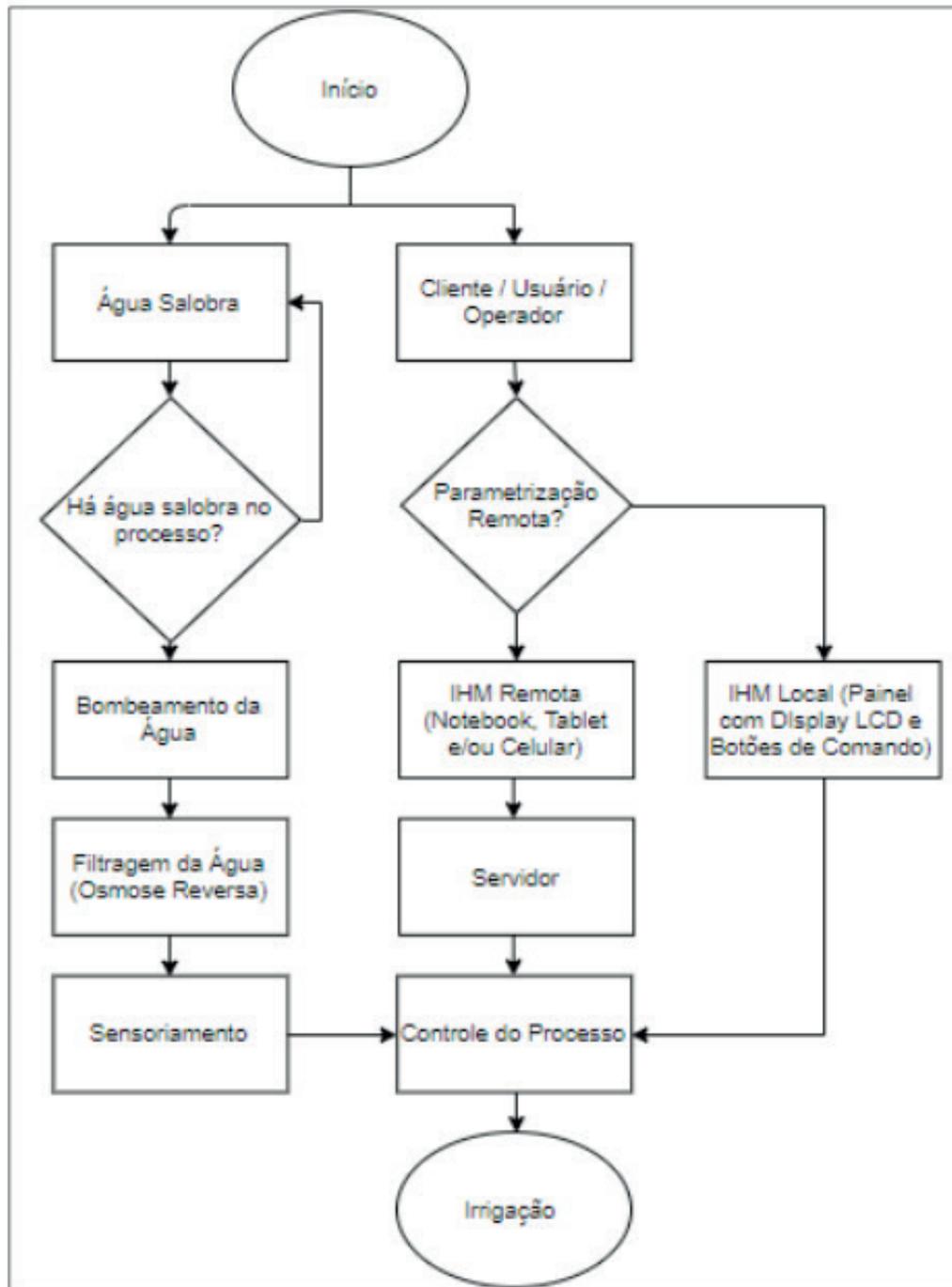


Figura 13 – Fluxograma do processo

Fonte: Próprio autor. 2019.

Os rejeitos salinos provenientes do processo de filtragem de osmose reversa são prejudiciais ao solo, portanto não podem ser descartados sem controle. Algumas alternativas para a reutilização desses rejeitos são: Piscicultura e Erva-sal ou palma.

A Piscicultura compreende na criação de peixes em água salobra. Muito utilizada em viveiros de tilápias, robalos e camarões, a água salobra simula o ambiente de estuário, onde vivem muitas espécies de peixes e crustáceos. Peixes de estuário possuem alta resistência ao sal, podendo viver em ambiente de água doce e salgada, como desembocaduras de rios para o mar.

A Erva-sal ou Palma são plantas que necessitam de sal para ter um melhor desenvolvimento. Muito comuns no semiárido. Poucas plantas possuem essa característica, e são úteis na alimentação do gado. No caso da Palma, são também ótimas reservas de água.

5 | CONCLUSÃO

O protótipo apresenta um sistema eficiente de Agricultura Controlada. Na **Tabela 4** pode ser observado as vantagens em relação à agricultura tradicional:

	Vantagens na aplicação da Agricultura Controlada
Recursos	Otimização do uso de água, energia e espaço no sistema de irrigação automatizado.
Dados	Coleta e armazenamento de dados, úteis na criação de relatórios e melhorias dos processos.
Saúde do plantio	Eficiência no combate de doenças e pragas.
Controle do ambiente	Controles de temperatura do ar, umidade e PH da água e do solo.
Eficiência	Maximização e aumento na produtividade de alimentos.
Produto	Produtos mais nutritivos e de melhor qualidade.

Tabela 4 – Vantagens da agricultura controlada frente a agricultura tradicional.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em artigos da Embrapa, 2019.

Disponível em: <embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/27045/recomendacoes-tecnicas-sobre-sistemas-de-controle-automaticos-para-agricultura-irrigadar>.

O protótipo desenvolvido também é capaz de realizar a retirada de água salobra de poços inativos e transformar em água potável, filtrando aproximadamente 99% dos resíduos sólidos, sendo o método mais eficiente de filtragem. Visando a produção do projeto para pequenos e médios agricultores do semiárido, com uma estrutura de controle mais robusta, é possível aumentar a produção de alimentos e contribuir no desenvolvimento das comunidades com acesso reduzido a condições básicas de saúde e alimentação.

REFERÊNCIAS

Carvalho, Roberto. *et al.* **Formação de Membranas Planas Celulósicas por Espalhamento Duplo para os Processos de Nanofiltração e Osmose Inversa.** 2001. Disponível em: <scielo.br/pdf/po/v11n2/6155.pdf>. Acesso em 19/09/2019.

MOURA, J. P. *et al.* **Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra**

do semi-árido nordestino. 2008. Disponível em:<aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/23343/15435>. Acesso em: 03 de março de 2019.

MUNIZ, ADEMIR.; ROCHA, EDGAR.; COMIM, CLAUDIO. **Dessalinizador Portátil de Uso Residencial.** São Paulo: Faculdade de Tecnologia de Itaquera “Miguel Reale”, 2015.

TESTEZLAF, ROBERTO. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2017, 1º Edição.

PAINEL DE BORDO - UMA INÉDITA PLATAFORMA COMPUTACIONAL EM UTILIZAÇÃO NO NOVO CENTRO DE OPERAÇÃO DA CEMIG-D

Data de aceite: 01/06/2020

Data de Submissão: 13/03/2020

Tiago Vilela Menezes

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte/Minas Gerais.
<http://lattes.cnpq.br/8983794350070959>

Bruno Henrique da Silva

<http://lattes.cnpq.br/7895466474396169>
Centro Universitário de Sete Lagoas - MG

Carlos Jose de Andrade

Universidade Vale do Rio Doce – Univale
Governador Valadares/Minas Gerais

Huliton Paz de Oliveira

Escola Técnica de Uberlândia – Uberlândia/Minas
Gerais

Marco Aurélio da Silva Fereda

Universidade Federal Uberlândia – Uberlândia/
Minas Gerais.

Odimar José Bezerra Lima

Universidade Presidente Antônio Carlos, UNIPAC
– Barbacena/Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/8919117693310806>

Rafael Carneiro Motta

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte/Minas Gerais.

RESUMO: Este trabalho traz uma síntese das principais características da nova plataforma computacional – Painel de Bordo em uso no Centro de Operação - COD da Cemig-D desde 2016, destacando-se os benefícios da sua utilização na operação em tempo real do sistema elétrico de potência. O Painel de Bordo traz ineditismo ao COD ao disponibilizar novas informações e dados do sistema elétrico em uma única plataforma corporativa, possibilitando análises e decisões antes inviáveis com os procedimentos tradicionais suportados, na sua maioria, em dados da ferramenta de supervisão e controle SCADA, principalmente em situações de contingências e desligamentos de elementos do sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Distribuição, Operação em Tempo Real, Plataforma Georreferenciada Integrada, Painel de Bordo, Consciência Situacional

DASHBOARD PANEL - A PIONEERING COMPUTACIONAL PLATFORM IN USE IN CEMIG'S NEW OPERATION CENTER

ABSTRACT: This works presents a summary about the main features of the new computational tool Dashboard Panel in use at Cemig-D's Operation Center - COD since 2016, emphasize

the advantage from its application in Real Time Operation of Electrical Power System. The Dashboard Panel brings newness to COD while it provides in a single corporate platform, electrical system new information and data, enabling analysis and decisions, before impractical by traditional procedures mostly based on SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition, mainly in occurrence of the electrical system and/or in breakdown of electrical system elements.

KEYWORDS: Distribution System, Real Time Operation, Integrated Georeferenced platform, Dashboard Panel, Situational Awareness

1 | INTRODUÇÃO

Com os novos contratos de Concessão do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil que passaram a vigor a partir de 2015, manter um alto patamar de qualidade do fornecimento com custos eficientes se tornou ainda mais relevante para a sustentabilidade do Negócio Distribuição nas Empresas. A ANEEL pode abrir processo administrativo com possibilidade de caducidade da concessão (1) se forem violados os indicadores de qualidade do serviço, DEC e FEC¹ em determinadas circunstâncias. Neste novo cenário, a área de operação da Cemig vem aprimorando seus procedimentos e ferramentas, principalmente a partir de 2010 com a unificação dos 7 (sete) Centros de Operação - COD regionais em um único COD em Belo Horizonte, e o Painel de Bordo é uma destas ferramentas. Caracteriza-se como uma plataforma computacional, cujo diferencial está na disponibilização de informações e dados inéditos para o tempo real, tanto no tipo quanto na forma, com dados georreferenciados integrados e sobrepostos ao sistema elétrico de potência - SEP que, somada às tradicionais técnicas de monitoramento e controle via sistema SCADA² e outras ferramentas de apoio, está contribuindo com melhorias na chamada consciência situacional dos operadores (2) (grau de coincidência sobre os aspectos influenciadores da operação do SEP), permitindo que estes consigam tomar decisões e ações de tempo real com mais velocidade e assertividade.

O Painel de Bordo aplica-se ao que se chama de Sistema Elétrico de Alta Tensão da (Sistema AT), que compreende cerca de 17 mil km de Linhas de Distribuição – LD e 400 subestações – SE, responsáveis pelo suprimento da área de concessão no estado de Minas Gerais de 567 mil km² com 8,5 milhões de clientes.

O texto está organizado em 5 Tópicos. Neste Capítulo 1 tem-se a contextualização geral, no Capítulo 2 estão os motivadores do desenvolvimento, no Capítulo 3 as características, funcionalidades e os benefícios do uso do Painel de Bordo na operação em tempo real. No Capítulo 4 estão mostrados dois casos reais de utilização e finalmente o Capítulo 5 com as conclusões e descrição dos aperfeiçoamentos em desenvolvimento.

1 FEC (frequência média de interrupção do fornecimento por consumidor) e DEC (tempo médio da interrupção por consumidor)

2 SCADA – Sistema de Supervisão e Controle Remoto

2 | MOTIVADORES

Os motivadores para a construção do Painel de Bordo originaram-se dos desafios inerentes de um sistema elétrico de grande porte, capilarizado, extenso e heterogêneo nas suas características técnicas, além da carência de uma ferramenta que produzisse e integrasse informações e sinais afetos à operação em tempo real, além dos tradicionais dados/grandezas elétricas que são disponibilizadas via sistema SCADA.

2.1 Operação em Tempo Real - Influenciadores

A Figura 1 mostra um desenho ilustrativo resumido dos grupos de fatores em torno do sistema elétrico que interferem na qualidade da operação em tempo real, destacando onde Painel de Bordo traz a sua contribuição ao COD.

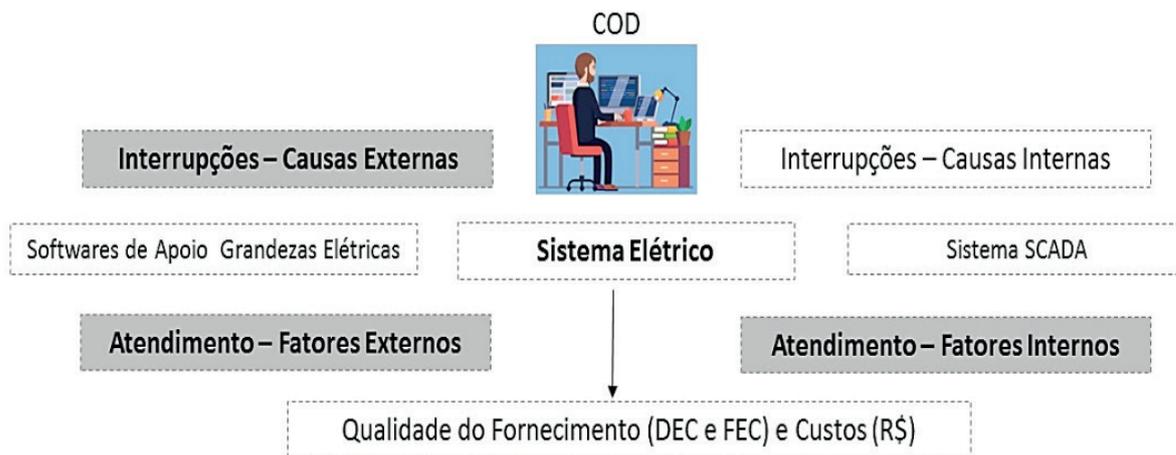
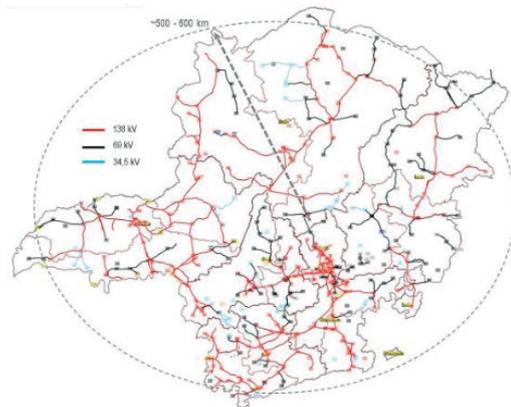


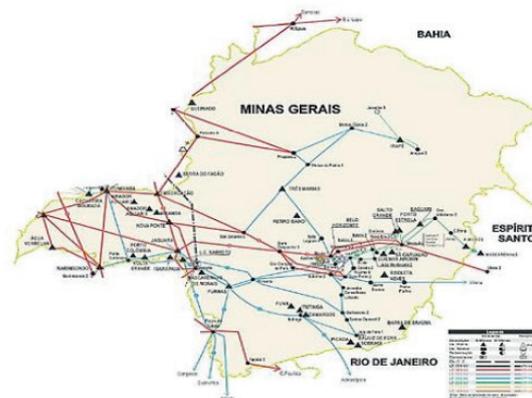
FIGURA 1 – Fatores Influenciadores - Operação em Tempo Real do SEP

2.2 Características do Sistema Elétrico

As particularidades do Sistema AT Cemig-D estão mostradas junto com o Sistema de Transmissão da área Minas na intenção de facilitar o entendimento dos desafios específicos do COD, a começar pelas respectivas Topologias mostradas nos mapas elétricos da Figura 2.



Sistema AT Cemig-D (3)



Sistema de Transmissão - MG (4)

FIGURA 2 – Sistema Elétrico AT e de Sistema de Transmissão

O Sistema de Distribuição AT tem naturalmente menos interligações do que o Sistema de Transmissão, ainda com eixos radiais e extensão similar à malha de 345 kV do Sistema Interligado Nacional – SIN (5). Os níveis de tensão típicos de 34,5 kV até 138 kV possuem confiabilidade inferior, sendo mais vulnerável à fatores externos que impactam seu desempenho. Outra característica são as distâncias envolvidas, já que o sistema AT atende os extremos da área de concessão, com raio médio de 500km a 600km, o que reflete complexidades de acionamentos e deslocamentos.

A Tabela 1 resume as diferentes características dos Sistemas Elétricos e os respectivos desafios do COD na operação em tempo real, constituindo-se parte dos motivadores para criação do Painel de Bordo em Módulos Múltiplos apresentados no Capítulo 3.

Características	Transmissão	Distribuição	Limitações/Desafios no COD
Topologia	Anel	Radial e Anel	Restrição de transferências de carga
Interligações	(N-1) Maioria	(N-1) Parcial	Menores flexibilidades operativas
Exposição à Falhas	Menor	Maior	Maior n° de falhas
Capilaridade	Menor	Maior	Maior Área de Exposição
Operadores nas SE	Maioria	Sem	Limitações de manobras remotas
Distâncias Equipe x Instalações	Menor	Maior	Maior tempo de deslocamentos
Acessos às Instalações	Urbano/Rural	Muito Rural	Com acessos complexos
Disponibilidade de Comunicação	Maior	Menor	Maior dificuldade em áreas distantes
Nível de Telecontrole	Reduntante	Parcial	Há perdas de telecontrole
Oscilografias Remotas	Maioria	Parcial	Maior tempo de análises de faltas
Indicador Regulatório	ParcelaVariável	cliente x tempo	Qualidade medida 24hs por dia

TABELA 1 – Características do SEP e Desafios COD na Operação em Tempo Real

2.3 Ferramentas Tradicionais - Limitações

As ferramentas de supervisão e controle elétrico via sistema SCADA naturalmente concentram-se nas variáveis elétricas, alarmes e proteções gerados, ficando o operador um tanto “cego” quanto aos outros fatores (externos e internos) que interferem no desempenho do SEP e nas decisões da operação do tempo real. Um resumo destas limitações está mostrado na Tabela 2.

Ferramentas Isoladas	Informação Disponibilizada	Limitação no COD
Fator Interno - Sistema SCADA	Grandezas Elétricas Pontuais, Alarmes e Comandos	Limitado ao telecontrole e telesupervisão Sem visão gráfica dos Fatores Externos e Internos (apresentados no capítulo 3)
Fator Interno - Diagramas Elétricos	Desenhos isolados de SE e LD	Sem georreferenciamento Sem Integração com outros Fatores
Fator Interno - Clientes Interrompidos	Tabela estática de Clientes Interrompidos	Sem gráficos de visualização Sem visão temporal por região Sem Comparação com limites regulatórios
Fator Externo - Sites de Meteorologia	Nuvens e descargas atmosféricas	Despadronização Acesso por Iniciativa Individual Sem Integração com Sistema Elétrico

TABELA 2 – Ferramentas e Limitações

3 | OS BENEFÍCIOS DO PAINEL DE BORDO PARA A OPERAÇÃO DO SEP

Este item descreve quais foram os requisitos básicos para construção dos Módulos Funcionais do Painel de Bordo, as características e as forma de aplicação e respectivos benefícios para as ações em tempo real no Centro de Operação

3.1 Requisitos e Características de TI

Os requisitos definidos com a área de TI da Cemig, responsável pela construção da plataforma, foram fundamentais para permitir que as funcionalidades do Painel de Bordo estivessem coerentes com as necessidades e dificuldades práticas do dia a dia dos operadores do COD, possibilitando garantir os seguintes ganhos observados

- a. Interface gráfica de fácil acesso;
- b. Para uso simultâneo de múltiplos usuários;
- c. Com multiplas camadas de informações georreferenciadas, integradas e sobrepostas ao sistema elétrico;
- d. Flexível para inserção de novos módulos funcionais e disponibilidade 24hs

O ponto de partida foi uma ferramenta interna Cemig chamada Geogoo, desenvolvida por uma área específica de manutenção, que se tornou disponível em 2014, e que fazia o registro e visualização de descargas atmosféricas detectadas pelo SLT – Sistema de

Localização de Tempestades sobreposta ao sistema elétrico.

O Painel de Bordo evoluiu para uma Infraestrutura Corporativa de Dados Espaciais (IDE) implantada na Cemig em 2015 para reorganizar o armazenamento, o acesso e a padronização do acervo de informações geoespaciais da empresa. A IDE é um conjunto integrado de tecnologias, políticas e procedimentos que possibilita a geração, o armazenamento e compartilhamento de informações geoespaciais interna ou externa, no âmbito da empresa.

Engloba um grande volume de imagens de satélites de alta, média e baixa resolução, utilizando o formato de webservices geográficos dos tipos WFS, WMS, WMTS, e outras, todas seguindo o padrão internacional OGC (Open GeoSpatial Consortium), uma organização voluntária internacional voltada para a definição dos padrões para uso e disseminação de informações geoespaciais. A Integração dos Módulos do Painel de Bordo se dá de forma automática e agendada através de Fluxos na ferramenta de ETL³ Geográfico FME⁴.

3.2 Benefícios

Mesclados com as habilidades e experiências dos operadores, os benefícios do Painel de Bordo para o COD tem se dado nas seguintes situações de tempo real:

- a. Condição Normal: Evitar e/ou minimizar o número de interrupções (FEC), com ações preventivas;
- b. Contingências: Reduzir o tempo de religamento para o maior número de clientes (DEC), com ações proativas;
- c. Otimizar e reduzir custos de equipes, no campo e no próprio COD (R\$).

Destacam-se os ganhos de proatividade e fluxo de interação do COD com as equipes e campo, antes limitado aos dados do SCADA e de descargas atmosféricas. Ressalta-se que o Painel de Bordo tem sido utilizada por outras áreas da empresa com relação direta com o sistema elétrico, por exemplo, planejamento, manutenção, automação. Os Módulos dos Fatores Externos e Internos ao sistema elétrico e respectivos benefícios proporcionados, estão apresentados na Tabela 3, para Condição Normal e Contingência do Sistema Elétrico.

³ ELT em inglês, Extraction, Transformation e Load. Refere às etapas pelas quais os dados passam antes de prontos para uso

⁴ FME em inglês, Feture Manipulator Engine. Plataforma de processamento e manipulação de dados geoespaciais

Módulo Fatores Externos	Condição Normal	Contingência
1 -Alertas Meteorológico	a) Aumentar a previsibilidade de riscos de interrupção por estes fatores	i) Mais informações auxiliando a interpretação dos eventos no SCADA
2 - Radar Meteorológico	b) Antecipar configurações operativas para melhorar a segurança	j) Maior assertividade na suspeita de falhas e realização de novos testes
3- Satélite Meteorológico	c) Otimizar preventivamente postos de operação do COD	k) Melhor acerto na indicação de possíveis locais de falta
4 -Descargas Atmosféricas	d) Antecipar e/ou prorrogar operadores do COD	l) Melhor orientação para as equipes de campo sobre o tipo provável de falha
5- Queimadas	e) Alertar e/ou acionar preventivamente equipes de campo para eliminar riscos iminentes	m) Melhor visão espacial de acessos e relevo para orientação das equipes de campo em inspeções
6 -Imagem de Satélite – Solo/ Vegetação	f) Melhorar a assertividade do quantitativo de sobreaviso	n) Melhor histórico para análise de pós-operação
7- Cidades/Estradas	g) Realizar ajustes na execução de intervenção programada	
8 -Divisões Regionais	h) Melhorar a indicação em inspeções de falhas transitórias	
Módulo Fatores Internos	Condição Normal	Contingência
9 - SE e LD	o) Melhor visão espacial do SEP e posicionamento relativo das equipes de campo	r) Melhor visão espacial do SEP para interpretação de ocorrências
10 - SE Móveis		s) Mais assertividade em novos testes remotos
11- Estruturas de LD	p) Melhor visão das bases fixas das equipes, agilizando acionamentos	t) Visualização de imagem de estruturas de LD permitindo melhor avaliação de falhas e disparo de inspeções
12 – Alimentadores de rede de média tensão - MT	q) Melhor visualização das equipes em serviço, agilizando acionamentos	u) Otimização de acionamentos das equipes mais próximas às falhas
13- Bases de Equipe de SE e LD		v) Acionamento mais ágil para disparar o uso de SE móveis
14- Veículos de Equipe de SE e LD em serviço		w) Visualização do deslocamento de equipes em atendimento
15- Veículos de Equipe de Rede MT em serviço		

TABELA 3 – Benefícios do Painel de Bordo para o COD na Operação em Tempo Real

3.3 Módulos Funcionais

Este item apresenta o conteúdo das informações geradas pelos Módulos Funcionais, que podem ser visualizados de forma simultânea ou não, e como são obtidos os benefícios a partir da sua utilização pelo COD.

a. Visão Geral e Módulos de Acesso

A Figura 3 mostra a Tela Inicial do Painel de Bordo com o sistema elétrico AT georrferenciado, e ao lado direito a imagem ampliada da janela de acesso aos Módulos.

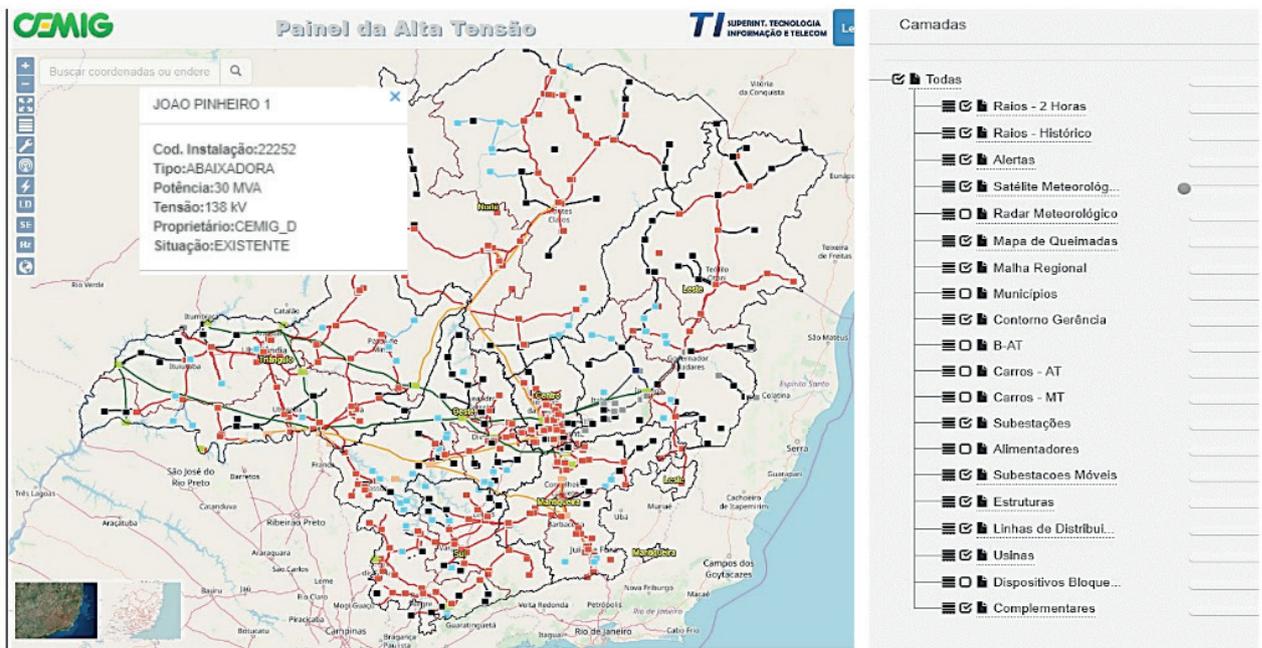
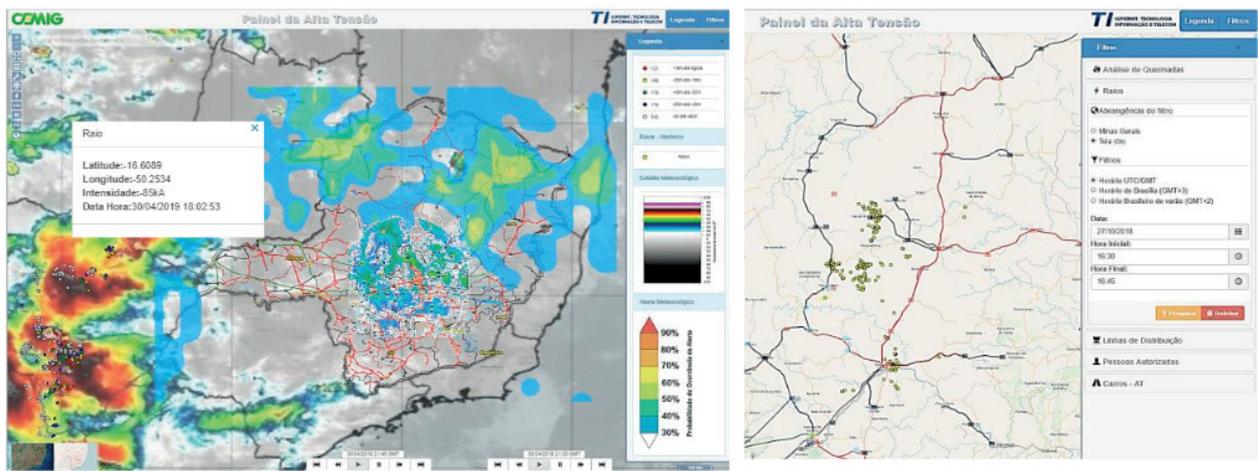


FIGURA 3 – Tela Inicial do Painel de Bordo e Acesso aos Módulos Funcionais

O Sistema Elétrico AT mostrado é georreferenciado, com as SE (quadrados) e as LD (linhas com as cores indicando níveis de tensão). No canto inferior esquerdo do mapa, a imagem de fundo pode ser alternada para visão de satélite, permitindo conhecer relevo, vegetação, topografia, etc.. Na janela dos Módulos, do primeiro ao nono estão os Fatores Externos e na sequência os Internos. A intensidade da visualização dos Módulos é ajustável pelo ícone ao lado.

b. Módulo de Fatores Externos – Dados Meteorológicos e Queimadas

A Figura 4 à esquerda mostra o módulo do Radar Meteorológico (círculo na região central de MG), do Satélite Meteorológico (manchas avermelhadas), de Descargas Atmosféricas (pontos coloridos) e dos Alertas Meteorológicos (áreas em azul) sobrepostos ao sistema elétrico. A imagem à direita mostra o Módulo do histórico de Descargas Atmosféricas mais utilizada na pós-operação e na gestão da manutenção para consulta de dias ou meses anteriores.



Descargas Atmosféricas, Satélite Meteorológico e Alertas

Descargas Atmosféricas – Consulta histórica

FIGURA 4: Módulo de Fatores Externos - Eventos Meteorológicos

As legendas ficam disponíveis do lado direito do mapa elétrico. Para as descargas, quanto mais “quente” a cor do ponto, mais recente é a incidência, que são gravadas em intervalos de 15 minutos (janela de até 120 min), mostrando intensidade (kA), local, dia e hora. Para as nuvens, quanto mais “quente” a cor, maior a intensidade da formação, e para os alertas com janela de até 7 dias, quanto mais “quente” a cor, maior a probabilidade desta previsão acontecer.

Ainda para os fatores externos, a Figura 5 mostra a informação de queimadas (símbolos coloridos de fogo no mapa).

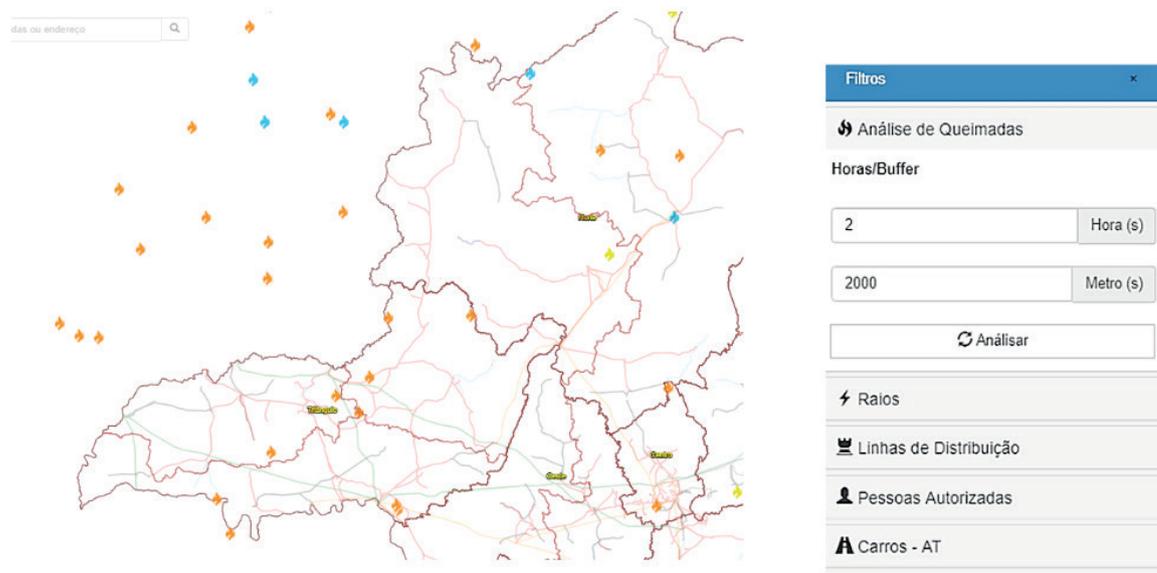


FIGURA 5: Módulo de Fator Externo - Queimadas

Os focos de queimadas podem ser vistos no intervalo de 24hs discriminados a cada 3 horas. Quanto mais “quente” a cor, mais recente é o evento. O COD normalmente deixa visível as queimadas das últimas 3 horas e no máximo a 2.000 metros distantes do sistema

elétrico, como indicado na imagem da direita da Figura 5.

Conforme a Tabela 3, com as informações dos Fatores Externos em tempo real, o COD tem conseguido atuar com mais assertividade, tanto preventivamente para melhor se preparar no caso de interrupções e para eliminar/reduzir riscos de interrupção quanto em contingências, utilizando-os para reduzir o tempo e custos de reestabelecimento.

c. Fatores Internos – Sistema Elétrico, Bases Operativas e Veículos

Na Figura 6 estão mostrados sobrepostos ao sistema elétrico (SE e LD), em sentido horário, o módulo de SE móveis, de estruturas de LD, de alimentadores de rede, de bases operativas e de veículos das equipes em tempo real.

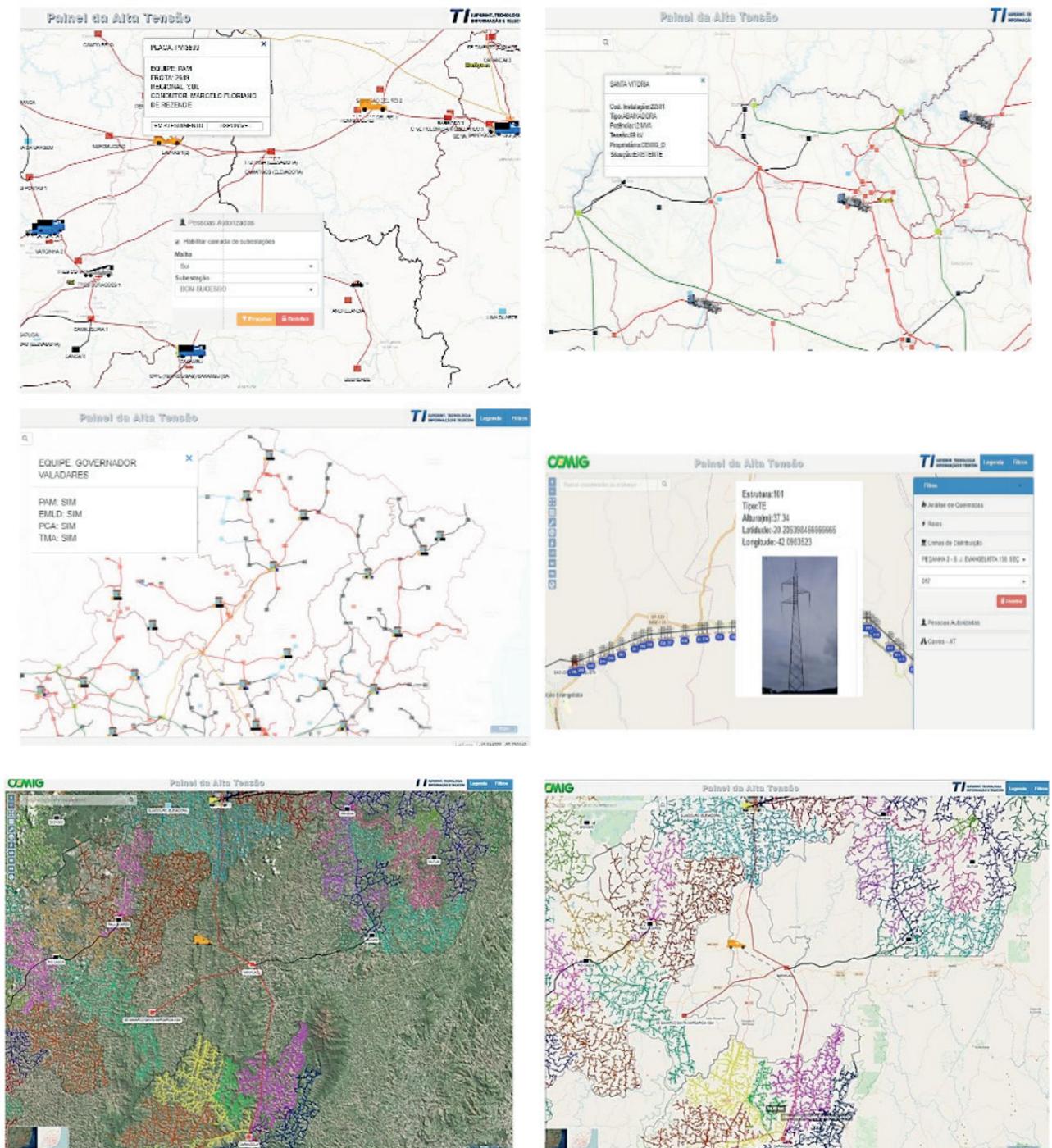


FIGURA 6: Módulo de Fatores Internos – Sistema Elétrico, Veículos e Bases Operativas

O módulo de SE Móveis é que permite ao COD visualizar a localização, características e disponibilidade destas instalações para acionamentos emergenciais com mais velocidade. O módulo de estruturas de LD é o que possibilita identificar remotamente as características das estruturas e fotos (madeira, concreto, metálica). O módulo de alimentadores é o que permite visualizar a rede e as possíveis interferências com LD e transferências de carga entre SE no caso de contingências. O módulo de Bases Operativas é o que possibilita ao COD visualizar quais os tipos e local das equipes e o módulo de Veículos em Serviço é o que permite visualizar em tempo real a posição e os deslocamento dos tipos de veículos e encontrar aquele mais próximo em serviço para o atendimento emergencial.

Conforme citado na Tabela 3, com as informações dos Fatores Internos em tempo real, o COD consegue tomar novas ações com mais velocidade e assertividade, principalmente nas situações de contingência. Por exemplo, agilizar decisões de emergência, fazer testes adicionais com segurança, melhorar a escolha dos acionamentos, a indicação dos prováveis tipos e pontos de falta, reduzindo tempo e custos de reestabelecimentos.

d. Módulo – Clientes Desligados e Controle do Montante de Uso do Sistema de Transmissão - MUST

A Figura 7 mostra à esquerda o Módulo de Gráfico Temporal de Cliente Interrompido e à direita o Módulo de Controle do MUST em tempo real.

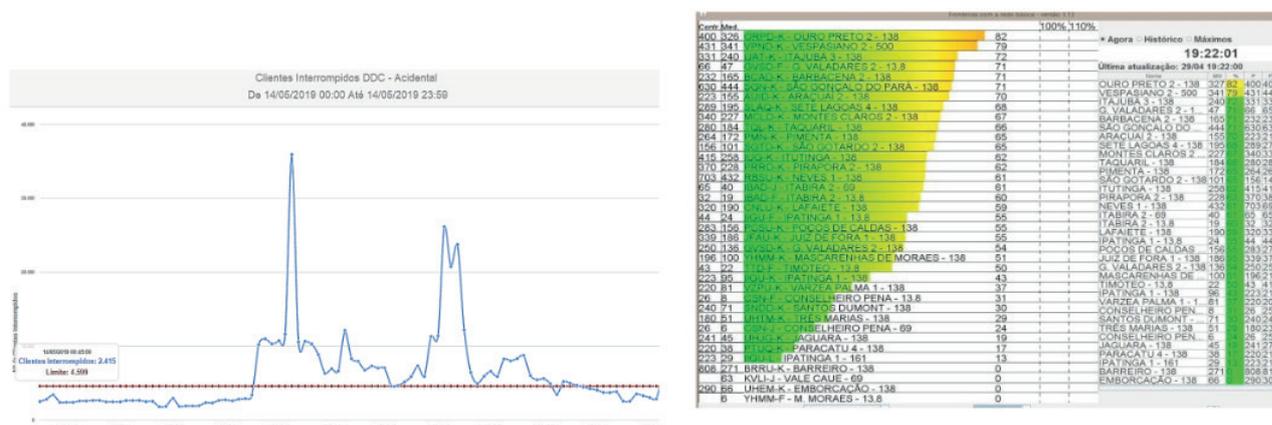


FIGURA 7: Módulo de Qualidade do Fornecimento e MUST

A linha reta vermelha é o limite regulatório diário do DEC e a linha azul é a visualização temporal 24hs dos clientes interrompidos. Imediatamente após um desligamento de uma SE ou LD, o COD consegue perceber o impacto na qualidade do fornecimento através dos picos observados no gráfico, servindo de base para avaliar o grau de urgência das ações de reestabelecimento. No painel do MUST, cada linha é um ponto de Conexão com a Rede Básica, facilitando a supervisão geral do MUST, permitindo ações rápidas de

controle para evitar violações regulatórias (6).

3.4 Painel de Bordo na Sala de Controle do COD

A Figura 8 é uma foto da sala de controle do COD e ilustra a disposição do Painel de Bordo.



FIGURA 8 – Painel de Bordo no VideoWall do COD

A localização central no telão (*videowall*) tem trazido ganhos para uniformizar a atenção dos operadores no sentido de dar abrangência e padronização sobre o grau de riscos ao sistema elétrico relativos aos Fatores Externos, além de estimular e facilitar o apoio mutuo entre postos de operação, produzindo decisões mais compartilhadas.

4 | RESULTADOS – USO DO PAINEL DE BORDO EM CONTINGÊNCIAS

Este tópico apresenta duas situações reais de aplicação do Painel de Bordo pelo COD mostradas na Figura 9, sendo que a da esquerda ilustra a contingência em uma LD e a da direita em uma SE.

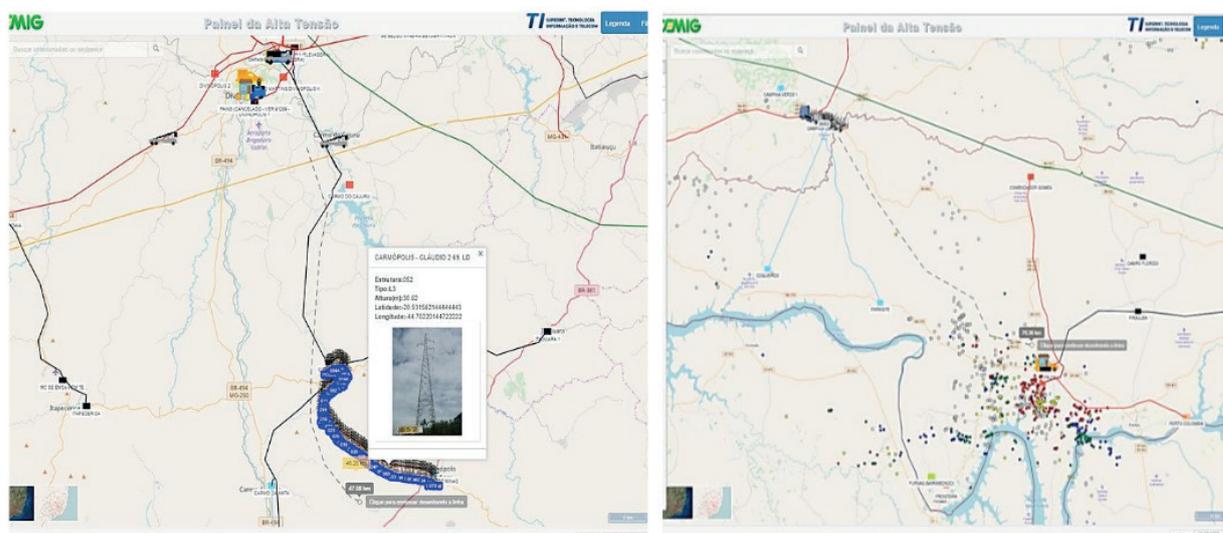


FIGURA 9 – Casos Reais de Aplicação do Painel de Bordo em Contingências.

A LD em contingência foi a LD radial 69 kV Cláudio 2 – Carmópolis, localizada no oeste do Estado, responsável pelo suprimento de cerca de 50 mil pessoas. Possui as características de Distribuição mostrados na Tabela 1, dentre elas, a ausência de operadores nas SE adjacentes, acessos rurais complexos, sem oscilografias remotas e telecontrole parcial. Através do SCADA, o COD visualizou os testes de religamento automático e as proteções operadas. Sem o Painel de Bordo, a ação seguinte do COD era acionar via telefone as equipes para manobras e inspeções locais, e aguardar contato telefônico do campo, sem mais informações e ações proativas. Com o Painel de Bordo, o operador do COD, neste caso, ampliou o seu campo de atuação com ações adicionais proativas, parte supracitadas na Tabela 3:

- Vegetação e relevo próximos: constatado morro e área de mata: hipótese de causa árvore;
- Ponto de falta indicado pelo relé: observado pelo Painel a presença de plantação de eucalipto;
- Tipo de Estruturas: verificou-se que era estrutura metálica robusta;
- Meteorologia e Queimadas: constatou-se que havia descargas atmosféricas, mas longe da LD e sem queimadas;
- Realização de novos testes: baseado nas informações, não foram feitos novos testes remotos pelo COD;
- Transferências de carga: foi observado pela rede MT que havia poucos pontos de interligação com outras SE;
- Limite regulatório de cliente interrompido: pode-se ver de imediato a violação do limite diário e a evolução temporal;
- Base Operativa: rapidamente o COD consultou qual base operativa e tipos de equipes estariam mais próxima;
- Equipes acionadas: foi possível visualizar e acionar as equipes de SE e LD em serviço e mais próximas;
- Interação com o campo: todas essas informações foram compartilhadas com as equipes acionadas;
- Deslocamento das equipes: foi possível acompanhar os deslocamentos e estimar o tempo de chegada no local, sem necessidade de novas ligações telefônicas que pudessem atrapalhar as equipes de campo e o próprio COD.

A equipe de LD foi para o local mais preparada com as informações prévias. Chegou ao local, confirmou árvore de grande porte fora da faixa de servidão sobre a LD, a retirou, e o COD reestabeleceu o sistema elétrico.

Nova caso da SE, a contingência foi na SE Frutal, localizada no Triângulo Mineiro, responsável pelo suprimento de quase 100 mil pessoas. Como no caso anterior, possui características de Distribuição mostrados na Tabela 1, dentre elas, ser radial, sem operadores nas SE, acessos rurais complexos, sem sinal de telefonia em alguns pontos,

sem oscilografias remotas e telecontrole parcial. Através do SCADA, o operador do COD visualizou as proteções operadas, fez as manobras e testes iniciais, sendo não satisfatórios. Sem o Painel de Bordo, a ação seguinte do operador era acionar via telefone a equipe de SE para manobras e inspeções locais, e aguardar contato telefônico, sem mais informações. Com o Painel de Bordo, o operador do COD, neste caso, ampliou seu campo de atuação com ações adicionais proativas, parte supracitadas na Tabela 3:

- Meteorologia e queimadas: constatou-se que havia muitas descargas atmosféricas sobre a SE, sem queimadas;

- Realização de novos testes: baseado nas informações, foram feitos novos testes remotos pelo COD;

- Transferências de carga: foi observado pela rede MT que havia pontos de interligação com outras SE;

- Limite regulatório de cliente interrompido: pode-se ver que o limite diário foi violado no momento;

- Equipes acionadas: foi possível visualizar e acionar as equipes de rede MT e de SE disponíveis e mais próximas;

- Interação com o campo: todas essas informações foram compartilhadas com as equipes acionadas;

- Deslocamento das equipes: foi possível acompanhar os deslocamentos e estimar o tempo de chegada no local, o que antes não se conseguia, principalmente nos trechos sem sinal de telefonia;

- SE Móvel: o COD verificou de imediato que existia uma SE Móvel disponível a 95 km de distância, o que agilizaria a decisão sobre este recurso, caso necessário. Antes, gastava-se bom tempo consultando a área de manutenção.

A equipe de rede MT chegou na SE Frutal antes da equipe de SE, fez as primeiras inspeções e verificou a suspeita de isolador danificado. A equipe de SE que estava mais preparada com as informações prévias, chegou em seguida, confirmou isolador do barramento de 13,8 kV danificado, fez os reparos e o COD reestabeleceu o sistema elétrico. Em ambos os casos, foi possível um decréscimo próximo de 30% no tempo de reestabelecimento e uma redução que pode ter atingido 20% nos custos de equipes e de deslocamentos. Na contingência da LD, as distâncias de deslocamento foram de 45km, e sem o Painel de Bordo poderiam ter chegado a 80km. Na contingência da SE, a informação antecipada de suspeita de descarga atmosférica fez a equipe passar pela base operativa e preparar a logística de material, dentre estes, isoladores reservas.

5 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma síntese da nova plataforma computacional Painel de Bordo, em uso no Centro de Operação da Cemig-D desde 2016, que vem trazendo ganhos

na gestão de informações afetas ao tempo real e, conseqüentemente, na assertividade das ações dos operadores.

Os motivadores foram as próprias características do sistema elétrico, de grande porte e heterogêneo, com complexidade de operação remota e no campo, associadas à constatação de que a supervisão e telecontrole do sistema elétrico via SCADA pelo COD precisava ser complementada com a visualização de outros fatores afetos à operação em tempo real, o que passou a ser possível com o Painel de Bordo.

A construção da ferramenta pela equipe própria da TI da Cemig a partir dos requisitos dos operadores do Centro de Operação - COD foi fundamental para garantir agilidade de desenvolvimento, praticidade no uso e flexibilidade para aplicação de novos módulos.

Os benefícios para a operação em tempo real são observados em condição normal e, principalmente, em situações de contingências, ao disponibilizar o acesso imediato de informações de outros fatores além dos dados do SCADA, e que interferem nas análises e decisões do COD, de forma georreferenciada e sobreposta ao sistema elétrico. Os dois casos práticos de aplicação descritos sinalizaram redução de 30% e de 20% nos tempos e nos custos de reestabelecimentos, respectivamente, quando o COD utilizou dados adicionais do Painel de Bordo nas decisões.

Como trabalhos futuros, citam-se os novos módulos em fase de estudos e/ou construção no Painel de Bordo, dentre eles o Módulo de Geradores, Módulo de Estruturas Emergenciais Disponíveis, Módulo de Imagens de Vídeo de Subestações, Módulo de Limites de Capacidade das Instalações e Instruções Operativas e o Módulo das Intervenções Programadas em Andamento, todos para aumentar o domínio da consciência das condições operativas e dos fatores que afetam as decisões em tempo real no Centro de Operação.

REFERÊNCIAS

- (1) ANEEL, Contrato de Concessão de Distribuição ANEEL e Cemig-D – Quinto Termo Aditivo, de 21/12/2015;
- (2) Endsley, Mica R, Human Factor, Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic System, de 1995;
- (3) Cemig, Sistema Georreferenciado Cemig-D, Painel de Bordo, de 12/2015;
- (4) ONS - PEL 2018 ONS – Plano de Operação Elétrica 2018/2019 – Volume III Principais Aspectos do Desempenho do SIN e Recomendações – Tomo 4: Área Minas Gerais, de 08/2018;
- (5) ONS - <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>, 05/2019;
- (6) ANEEL, Resolução ANEEL 666/2015 - Montante de Uso do Sistema de Transmissão - MUST, de 06/2015.

PARADIGMAS DAS TECNOLOGIAS 5G NA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS VERTICAIS NA INDÚSTRIA 4.0

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 17/04/2020

Daniel Rodrigues Ferraz Izario

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp
Campinas - São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/9174775045358016>

João Luiz Brancalhone Filho

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
Santa Rita do Sapucaí - Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0001-9086-3915>

Yuzo Iano

Universidade Estadual de Campinas - Unicamp
Campinas - São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/1819902045004845>

Karine Mendes Siqueira Rodrigues Ferraz Izario

Faculdade Anhanguera - Anhanguera
Indaiatuba - São Paulo
<https://orcid.org/0000-0001-9848-7029>

RESUMO: Este artigo aborda os principais usos da tecnologia 5G, em como suas consequências nos sistemas verticais e em específico, na automação industrial. Também estabelece relações entre indicadores de desempenho chave em diversos cenários com o uso de outras tecnologias de comunicação

já existentes, como redes cabeadas e LTE. São observadas vantagens significativas nos diversos cenários mostrados principalmente devido à nova topologia distribuída da rede 5G.
PALAVRAS-CHAVE: 5G, Automação, Indicadores de Desempenho Chave, Sistemas Verticais, Topologia Distribuída.

PARADIGMS OF THE 5G TECHNOLOGIES IN THE AUTOMATION OF VERTICAL SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0

ABSTRACT: This article approaches the main uses of the 5G technology as well as its consequences in the vertical systems and, more specifically, in the industrial automation. It also establishes relations among key performance indicators in several scenarios with other technologies currently in use such as cabled networks and LTE. Significant advantages are experienced in many exposed scenarios, mainly owing to the new distributed 5G network's topology.

KEYWORDS: 5G, Automation, Distributed Topology, Key Performance Indicator, Vertical Systems.

1 | INTRODUÇÃO

A 5ª Geração (5G) de comunicações móveis tem um importante papel na automação de sistemas verticais, por suas características intrínsecas, como o suporte de aplicações de Internet das Coisas (em inglês, *Internet of Things* - IoT) e comunicação M2M (*Machine-to-Machine*, em português, Máquina à Máquina), além da, baixíssima latência, economia de energia, escalabilidade, alta QoS (*Quality of Service*, em português, Qualidade de Serviço) e altas taxas de dados, podendo ser o marco e o responsável, de fato, pela denominada 4ª Revolução Industrial (ou Indústria 4.0) (5G *Americas*, 2018), como apresentado na FIGURA 1.

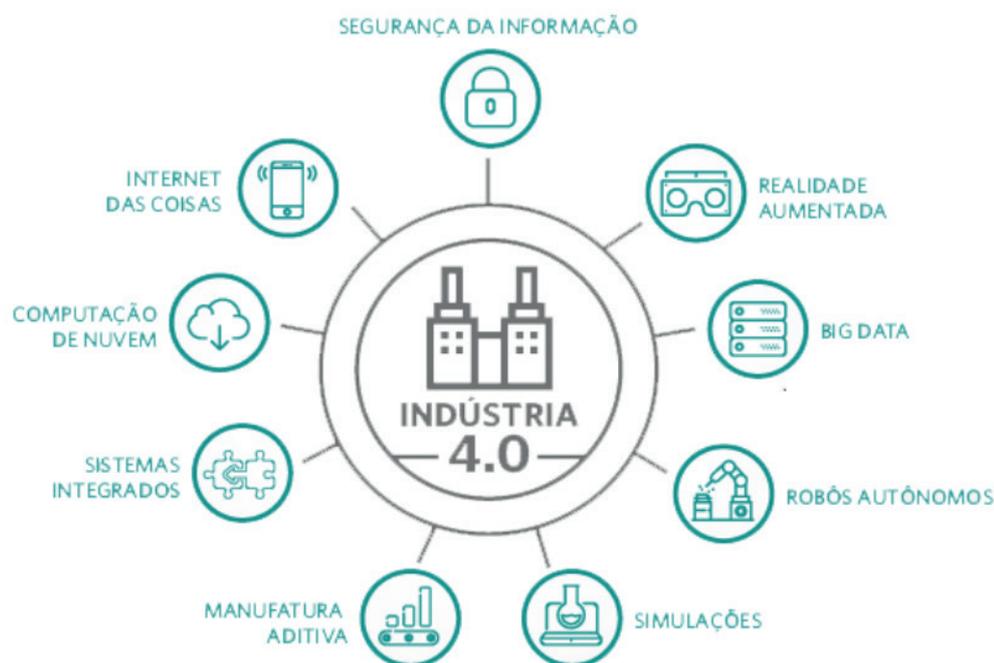


Figura 1: Indústria 4.0.

Apesar de oferecer potenciais benefícios, como a ausência de cabeamentos e a redução de custos, além da, melhor gestão fabril e de recursos, há notável resistência na adoção das diversas tecnologias de comunicação sem fio na automação industrial, resistência maior do que a encontrada na aceitação das aplicações voltadas ao consumo direto do consumidor. A principal razão é a falta de confiabilidade nas mesmas em comparação com as tecnologias baseadas em sistemas cabeados, levando em conta que aplicações industriais tendem a ser mais críticas do que as voltadas ao usuário final (5G *Americas*, 2018).

Este é um paradigma que o 5G terá que enfrentar, mas o resultado parece promissor já que, diferente de tecnologias legadas, sua velocidade é maior, sua latência, menor, além da combinação de oferecer, em uma estrutura unificada, comunicações de curto e longo alcance, como RFID (*Radio-Frequency IDentification*, em português, Identificação

por Radiofrequência) e Bluetooth com a tecnologia celular, está com o uso de pequenas células e redes heterogêneas. Por este conjunto de características, acredita-se que o 5G será fundamental na IoT, demonstrando sua importância no âmbito da automação.

Iniciadas na década de 1970, as comunicações móveis de 1ª Geração (G) eram exclusivas para o tráfego de voz. Ao longo dos anos, no entanto, com o aumento na capacidade e digitalização da transmissão, bem como com a criação de novos dispositivos digitais, houve o grande aumento no tráfego de dados não vinculados à voz, inicialmente mesmo na comunicação entre pessoas, o denominado P2P (*Person-to-Person*, em português, Pessoa à Pessoa), como no caso de mensagens de texto SMS (*Short Message Service*, em português, Serviço de Mensagens Curtas).

Ao início da conexão dos primeiros telefones celulares à internet, mais comumente desde à 3ª Geração (3G) da telefonia móvel, bem como com a criação de aplicativos em plataformas móveis, houve um grande aumento na porcentagem do tráfego de dados P2M (*Person-to-Machine*, em português, Pessoa à Máquina) ou onde há a interação de pessoas com atividades automatizadas, como o que ocorre frequentemente ao acessar a uma aplicação para a transferência bancária ou pagamentos (5G *Americas*, 2018).

Em menor escala desde o 3G, já houve uso de tecnologias móveis nas comunicações M2M, o modelo de comunicação com maior aplicação na automação industrial, uso que não conseguiu grande significância devido a percepção de falta de confiabilidade sobre as redes sem fio. No 5G devido à baixa latência bem como maior versatilidade de conexão e velocidade, é esperada uma mudança de paradigma quanto a confiabilidade neste tipo de rede sem fio, bem como conseqüente maior uso nas comunicações M2M. Além dessas aplicações citadas, da telefonia e banda larga móvel, espera-se também que o 5G seja utilizado também em novas aplicações, nos denominados domínios verticais (5G *Americas*, 2018).

2 | METODOLOGIA

Para implementar o uso de 5G no ambiente da automação vertical, é necessário entender a definição dos domínios verticais, esses correspondem a maior parte da demanda, que compreende indústrias ou grupos de empreendimentos, nos quais, são desenvolvidos produtos similares ou serviços (5G *Americas*, 2018), são exemplos:

Monitoramento a Distância

- Serviços Públicos: Monitoramento de eletricidade, água;
- Saúde: Monitoramento remoto de pacientes;

- Consumidores: Alarmes, sensores de segurança e m-saúde;

Rastreamento de Ativos

- Transporte: Administração e monitoramento de frotas;
- Consumidor: Rastreamento de ativos;
- Automotivo: Administração de frotas e recuperação de veículos roubados;
- Indústria: Operações de varejo/armazém;

Automação de Operações

- Indústria: Automação em tempo real;
- Saúde: Cirurgia a distância e robótica automatizada;
- Imóveis Comerciais: Automação de instalações;
- Construção, Petróleo & Gás, Mineração: Automação de máquinas;

Manutenção Preventiva

- Transporte & Automotivo: Reparos veiculares e substituição de baterias;
- Indústria: Manutenção de equipamentos;
- Imóveis Comerciais: HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning, em português, Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado - AVAC), aquecedores, iluminação e manutenção;

Streaming de Vídeos

- Consumidor: Câmeras de segurança;
- Imóveis Comerciais: Câmeras de segurança inteligentes;

Outras

- Transporte & Automotivo: Veículos autônomos;
- Consumidor & Automotivo: Carros conectados e eletrodoméstico conectados;
- Varejo: Promoções em lojas em tempo real;

Estes sistemas possuem demandas exigentes quanto a vários aspectos, como latência, taxa de dados, disponibilidade e, em alguns casos, sistemas de posicionamento de alta-precisão.

Nesta e nas demais abordagens existentes referentes as aplicações, há conforme descrita pela ISO (*International Standardization Organization*, em português, Organização Internacional de Padronização) (ISO, 2020), o conceito de confiança em um sistema, definida como “a capacidade de funcionamento quando solicitado”, no qual, é dividida em cinco propriedades de grande importância e uso recorrente, descritas na TABELA 1.

PROPRIEDADES	DESCRIÇÃO
Confiabilidade	Continuidade da operação de maneira correta. Propriedade tipicamente definida como o tempo médio entre falhas ocorridas. Redes de automação devem ser confiáveis e, geralmente, quanto menos indisponibilidade houver, melhor será o sistema.
Disponibilidade	Prontidão para a operação de maneira correta quando solicitado. Propriedade classificada pela porcentagem do tempo em que o sistema opera corretamente. No caso da disponibilidade, por exemplo, se houver um atraso maior que o estipulado, o sistema é considerado indisponível.
Manutenibilidade	Habilidade de se submeter a manutenções e reparos. Pode ser mensurada pelo tempo médio de reparo, em como a probabilidade de reparos num dado período.
Segurança	Ausência de consequências catastróficas ao usuário e ao meio-ambiente.
Integridade	Ausência de alterações impróprias no sistema.

TABELA 1: As cinco propriedades de grande importância e uso recorrente nos domínios verticais (5G Americas, 2018).

O sistema 5G é construído sob um acesso flexível, ou seja, permite aplicações distribuídas ou centralizadas para a alocação de demandas, isto, sendo conectado até o *data center* responsável pelo armazenamento dos dados, bem como, gerência de rede, como apresentado na FIGURA 2.

Nas gerações anteriores de comunicações móveis, o que corresponde também à maior parte da estrutura funcional instalada, havia, quase a totalidade, aplicações centralizadas, onde diversos dispositivos se conectam à web, responsável pelo armazenamento e controle central.

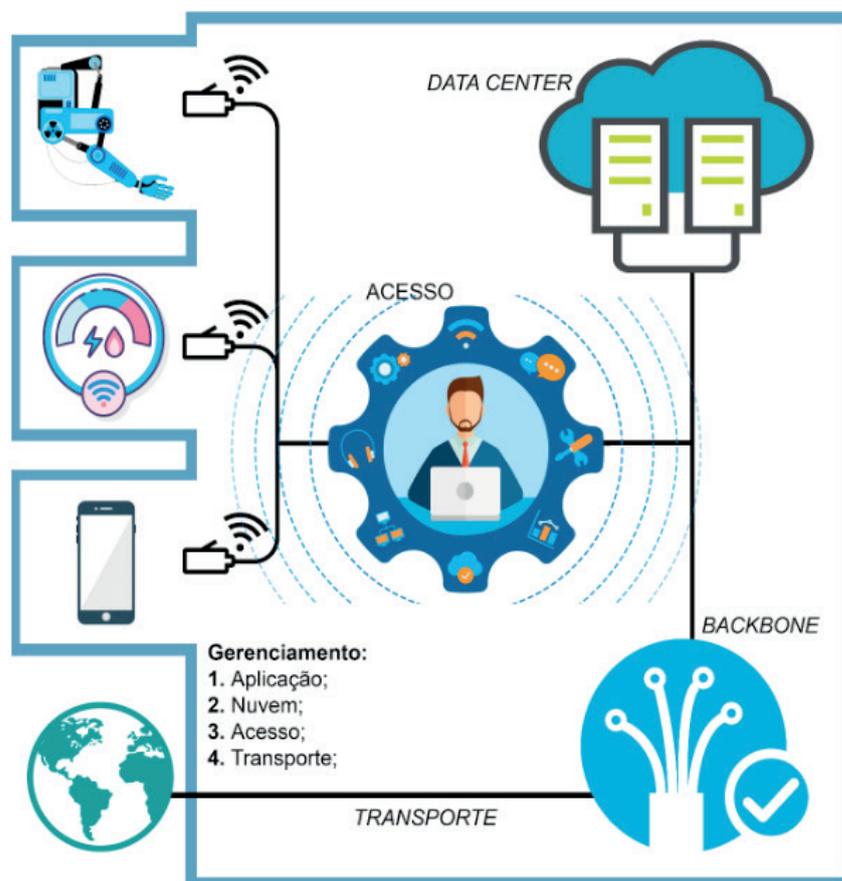


Figura 2: Formas de gerenciamento 5G.

Entretanto, a estrutura se mostra ineficiente para os padrões de velocidade e latência desejados no 5G, no qual, dispositivos finais ou intermediários devem-se comunicar entre si, sem o uso de uma estrutura central, como pode ser observado nas formas de gerenciamento 1 e 2 (FIGURA 2), exemplos de aplicações distribuídas, enquanto as 3 e 4 (FIGURA 2), são exemplo de aplicações centralizadas.

Para a abordagem deste modelo de estrutura deve-se considerar o esquema já existente da denominada “área distribuída de radiocomunicação industrial”, este mencionado no *release 16* (3GPP, 2020).

Na FIGURA 3, a primeira camada do sistema se encontra as funções de automação distribuída, o que faz a interface entre as funções de comunicação com os dispositivos para coleta de dados como I/Os (*Input/Output*, em português, Entrada/Saída), sensores, *encoders*, *drivers*, *switches*. Esta função de comunicação distribuída se comunica entre si através do meio de comunicação, o que é fundamental para o funcionamento da aplicação da automação, um ponto chave para a Indústria 4.0.

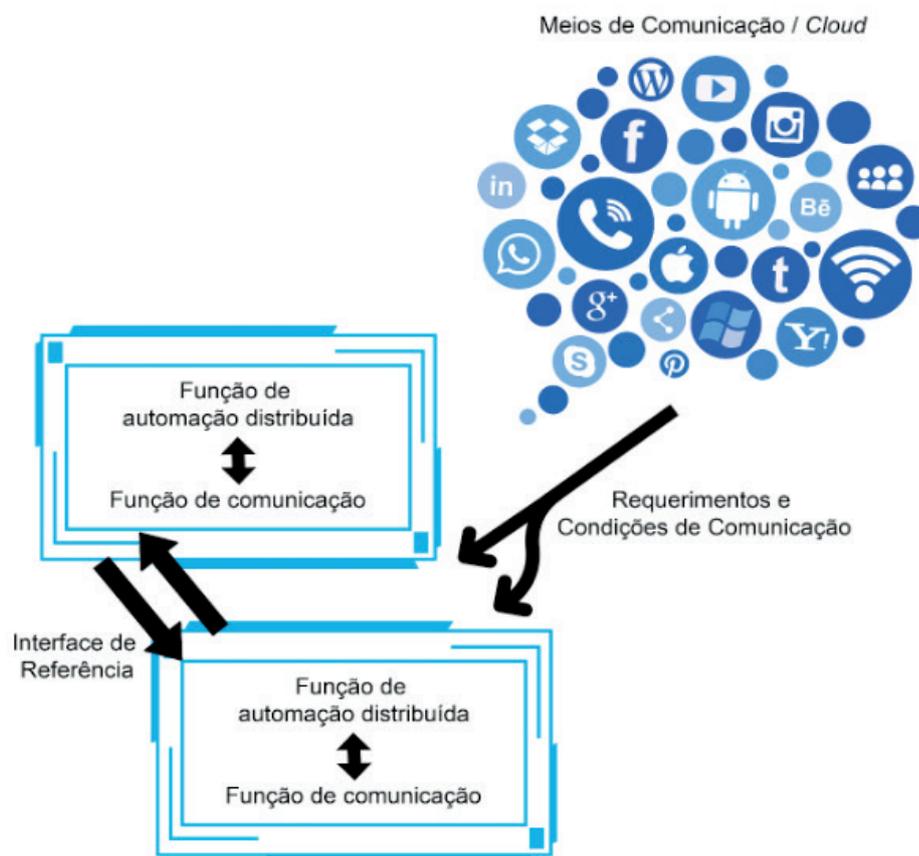


Figura 3: Aplicação de automação distribuída.

3 | RESULTADOS

Nos últimos anos o rápido avanço do número de usuários, bem como a rápida liderança das tecnologias anteriores como as de 3ª e 4ª Geração, pouco após seus lançamentos, faz com que as projeções da GSMA (*Global System for Mobile Association*, em português, Sistema Global para Associação Móvel) de uso do 5G, nos seus diversos segmentos de operação, na casa dos bilhões de usuários no período de 5 anos.

Conforme citado anteriormente, muitas expectativas de usos fora da telefonia móvel, são esperados, mas podendo causar grandes impactos nas áreas da Indústria 4.0, principalmente em três grandes domínios verticais: automação industrial, automação de processos e interface homem-máquina.

A. Estudo dos impactos do 5G

O desenvolvimento do 5G ocorre num momento de grande automação das indústrias, por tecnologias como IoT, aprendizagem automática, sistemas de visão e robótica, o que é considerado muito favorável. A “fábrica do futuro”, como é vagamente denominada a tendência do uso destas tecnologias incorporada em diversas categorias de redes *high-end* em ambiente industrial com diferentes performances, exigências e resultados, descritas na TABELA 2.

B. KPIs

Segundo a agência reguladora 3GPP (*3rd Generation Partnership Program*), os parâmetros esperados para desempenho do uso de 5G na automação nos domínios verticais estão disponíveis na *release 15* (3GPP, 2020), sendo eles automação de sistemas discretos, automação de processos, automação de sistemas de distribuição de energia e sistemas de transporte inteligente.

A *release 15* mencionada, refere-se às maneiras de interoperação e em alguns casos, emulação do 5G com tecnologias já existentes e utilizadas no meio da automação como WLAN (*Wireless Local Area Network*, em português, Rede Local Sem Fios) e redes cabeadas, bem como nas redes dentro do ambiente industrial (Bent, 2020). Para cada um destes domínios, em alguns casos até subdomínios, há a expectativa de diferentes KPIs (*Key Performance Indicator*, em português, Indicador-Chave de Desempenho), descritas na TABELA 3 e TABELA 4.

CATEGORIA	CENÁRIO	IMPACTO
Processos em tempo crítico	1. Tempo real, controle automatizado em <i>loop</i> fechado; 2. Interação homem-máquina orientada a vídeo; 3. Realidade Virtual e Realidade Aumentada para manutenção e treinamento;	Melhora na eficiência e rendimentos assim como segurança.
Processos em ambiente industrial fora de tempo real	1. Rastreamento de produtos e inventários de equipamentos; 2. Sensoriamento de dados fora de tempo real; 3. Inspeções e diagnósticos remotos;	Melhora no gerenciamento dos meios de produção.

Comunicação empresarial	1. Logística e armazenamento; 2. Comunicações BackOffice e entre funcionários; 3. Rastreamento de produtos após a produção;	Melhora nos negócios.
-------------------------	---	-----------------------

TABELA 2: Três exemplos de categoria de redes 5G.

A visualização dos indicadores nos quatro principais domínios verticais, e subdomínios, quando aplicável, são descritas na TABELA 3. E na TABELA 4, há os indicadores esperados em domínios dentro do ambiente industrial.

Alguns dados são levados em consideração nas tabelas, por exemplo, a disponibilidade se refere às interfaces de serviço, a confiança com o sistema em si, e para que os parâmetros de confiança sejam alcançados, poderá haver mais de uma transmissão. O *payload* referido como pequeno é de tamanho inferior a 256 bytes. Outro ponto, é que todas as aplicações conectadas dentro do volume de serviços exijam a taxa de dados igual à do usuário, e em caso da taxa de penetração do 5G ser igual à 100 %. Valores de dimensão máxima, são estimados, exceto no ponto em que se refere à dimensão vertical. Por último, o tempo de ciclo se refere ao tempo necessário para a geração de um sinal, o seu transporte através da rede para um sensor ou atuador e o seu retorno, com a confirmação do recebimento.

CENÁRIO	MÁXIMA LATÊNCIA	TEMPO SOBREVIVÊNCIA	DISPONIBILIDADE SERVIÇOS	CONFIABILIDADE	TAXA DADOS	TAMANHO PAYLOAD	DENSIDADE TRÁFEGO	DENSIDADE CONEXÃO	DIMENSÃO ÁREA
Automação discreta	10 ms	0 ms	99,99%	99,99%	10 Mbps	Pequeno à Grande	1T bps/km ²	100000/m ²	1000 m x 1000 m x 30 m
Automação de processos: controle remoto	60 ms	100 ms	99,9999%	99,999%	1 à 100 Mbps	Pequeno à Grande	100G bps/km ²	1000/m ²	300 m X 300 m x 50 m
Automação de processos: monitorização	60 ms	100 ms	99,9%	99,9%	1 Mbps	Pequeno	10G bps/km ²	10000/m ²	300 m X 300 m x 50 m
Distribuição de eletricidade: média tensão	40 ms	25 ms	99,9%)	99,9%	10 Mbps	Pequeno à Grande	10G bps/km ²	1000/m ²	100000 m sob linha viva
Distribuição de eletricidade: alta tensão	5 ms	10 ms	99,9999%	99,999%	10 Mbps	Pequeno	100G bps/km ²	1000/m ²	200000 m sob linha viva
Sistema inteligente de transportes: infraestrutura	30 ms	100 ms	99,9999%	99,999%	10 Mbps	Pequeno à Grande	10G bps/km ²	1000/m ²	2000 m sob autoestrada

TABELA 3: Indicadores nos quatro principais domínios verticais, bem como em seus subdomínios (5G Americas, 2018).

CASOS DE USO		DISPONIBILIDADE MÍNIMA	TEMPO CICLO	TAMANHO PAYLOAD	NÚMERO DISPOSITIVOS	DIMENSÃO ÁREA
Controle de Movimento	Máquinas de impressão	99,9999 %	< 2 ms	20 bytes	> 100	100 m x 100 m x 30 m
	Ferramentas mecânicas	99,9999 %	< 0,5 ms	50 bytes	≈ 20	15 m x 15 m x 3 m
	Máquinas de empacotamento	99,9999 %	< 1 ms	40 bytes	≈ 50	10 m x 5 m x 3 m
Robôs Móveis	Controle de movimentos corporativos	99,9999 %	1 ms	40-250 bytes	100	< 1 m
	Com controles remotos operados por vídeo	99,9999 %	10-100 ms	15-150 bytes	100	< 1 m
Painéis de Controle	Robôs de montagem e fresadoras	99,9999 %	4-8 ms	40-250 bytes	4	10 m x 10 m
	Guindastes móveis	99,9999 %	12 ms	40-250 bytes	2	40 m x 60 m
Automação de Processos		99,99 %	> 50 ms	Variável	10000 por km ²	

TABELA 4: Indicadores esperados em domínios dentro do ambiente industrial

(Brown, 2016).

C. Distribuição de Energia e Administração de Falhas

A administração de falhas e a recuperação da distribuição de energia, caso elas ocorram, é algo que exige diversas manobras complexas em pouco tempo, normalmente feitas manualmente como, mas não somente, coleta e análise de dados da rede, isolamento de falhas, determinação de medidas apropriadas, isolamento de falhas, restauração do serviço, informação à equipe de manutenção e, restauração da configuração normal de rede, após correção das falhas (Schwaderer, 2019).

No caso de grandes áreas ou falhas simultâneas, a situação se torna significativamente mais complexa, o que evidencia a importância de sistemas automatizados com a utilização de tecnologias 5G, principalmente devido à baixa latência (menor do que 500ms).

Entretanto, existe a possibilidade do uso do FLISR (*Fault Location, Isolation & Service Restoration*), que é um localizador de falhas e isolador de serviços este designado para o desligamento e alteração de linhas com sobrecarga, utilizando uma topologia distribuída com diversos controladores lógicos programáveis, localizados nos polos dos alimentadores com inteligência local e capacidade de comunicação P2P, não havendo necessidade de um sistema de controle local ou regional. Outro ponto, é a existência do suporte a este tipo de aplicação através da padronização internacional IEC 61850 (Souza, 2012), no qual, estão previstos os requerimentos de flexibilidade e interatividade para a implantação da aplicação (Schwaderer, 2019).

Na FIGURA 4, é apresentado a topologia completa IEC 61850, sendo possível

verificar o isolamento da área que requer restauração de serviço permitindo a realocação para o local mais próximo com alimentação.

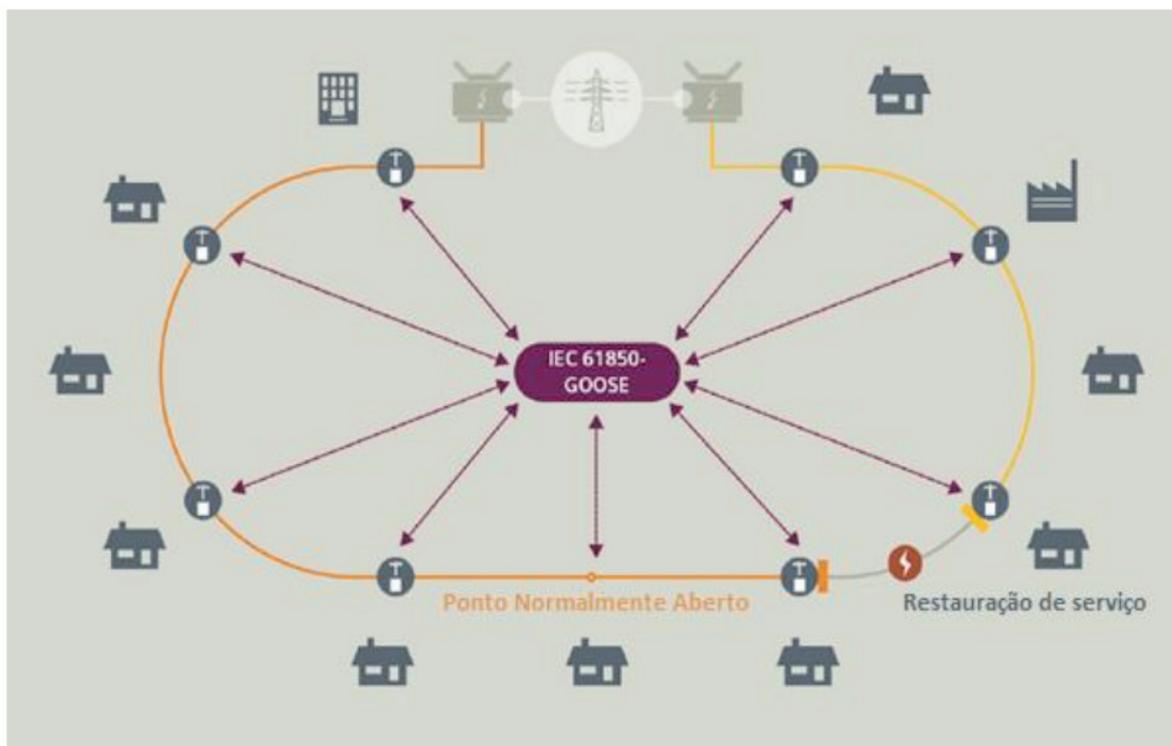


Figura 4: Topologia completa IEC 61850.

D. Controles robóticos de movimentos

Ferramentas mecânicas, máquinas de montagem, empacadoras e veículos autônomos, são todos exemplos de controles automatizados de movimento. Segundo (3GPP, 2020), a latência nestes cenários não pode ultrapassar 1 ms, bem como, 99,9999 % de confiabilidade e 2 ms no tempo de ciclo.

Todas estas demandas favorecem bastante o uso das tecnologias 5G neste tipo de mercado, já que um dos grandes problemas do uso das tecnologias tradicionais, neste caso, é a interferência causada por estruturas metálicas. Junto a isso, os requerimentos de baixa latência fazem a transmissão de pacotes de dados pouco prática ou até mesmo impossível.

As tecnologias 5G podem ser muito úteis num cenário como esse na medida que permite a transmissão de pacotes com um menor *frame* sem a espera do *frame ack* (*acknowledgment*), responsável pelo reconhecimento da recepção. Existe a possibilidade da implantação de conectividade por múltiplos percursos, podendo manter a continuidade do processo em caso de perda de algum pacote.

Pelo conjunto de baixíssima latência e alta disponibilidade, é possível a aplicação de diversos fatores, neles incluindo, frequência, temporal e espacial em aplicações como braços mecânicos e serviços autônomos. Considerando que o 5G faz uso de banda bastante estreita (100 MHz/canal), a diversidade de frequência não se mostra promissora

na obtenção de ganhos, apenas na maior confiabilidade, mas há a possibilidade de melhora na diversidade espacial através CoMP (*Coordinated Multi Point*, em português, Multipontos Coordenados), já padronizada no 5G, que permitirá a transmissão do mesmo pacote em múltiplos pontos, prevenindo perdas (Schwaderer, 2019).

4 | CONCLUSÃO

Há muitos exemplos de como as tecnologias 5G podem ter grande importância na Indústria 4.0, isso se refere, ao ambiente industrial interno e externo, em muitas atividades as quais inclusive sua atuação não é claramente perceptível, como no reestabelecimento após interrupção da rede elétrica comercial. Além do aumento da velocidade comparado com as tecnologias de gerações anteriores, a estrutura distribuída e um de seus destaques, a diminuição da latência, no qual, tem grande importância, podendo quebrar, em definitivo, o paradigma de falta de confiabilidade associadas às tecnologias sem fio em ambientes de automação.

REFERÊNCIAS

3GPP, **3GPP**. *3rd Generation Paternship Program*. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/>>. Acessado em: 15 de maio de 2020.

3GPP, **Release 15**. *3rd Generation Paternship Program*. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-15>>. Acessado em: 15 de maio de 2020.

3GPP, **Release 16**. *3rd Generation Paternship Program*. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-16>>. Acessado em: 15 de maio de 2020.

5G Americas, **5G Communications for Authomation Vertical Domains**. *5G Americas Whitepaper*, 2018. Disponível em <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/5G_Americas_White_Paper_Communications_for_Automation_in_Vertical_Domains_November_2018.pdf>. Acessado em 12 de abril de 2020.

Bent, Henk Van der, **Wireless Technology in Industrial Authomation**. *Yokogawa Europe BV - Vigilant Plant Whitepaper*. Disponível em <https://web-material3.yokogawa.com/ISA100-whitepaper.pdf?_ga=2.181686752.695514765.1586637962-198698714.1585854637>. Acessado em: 12 de abril de 2020.

Brown, Gabriel, **Ultra-reliable Low-Latency 5G for Industrial Automation**. Qualcomm, 2016. Disponível em <<https://www.qualcomm.com/media/docum ents/files/read-the-white-paper-by-heavy-reading.pdf>>. Acessado em 12 de abril de 2020.

ISO, **International Organization for Standardization**. Disponível em: <<https://www.iso.org/home.html>>. Acessado em: 10 de abril de 2020.

Schwaderer, Curt, **5G Adds Distributed Cloud Capability for Intelligent Edge**. *Embedded Computer Design*, 2019. Disponível em: <<https://www.embedded-computing.com/guest-blogs/5g-adds-distributed-cloud-capability-for-intelligent-edge>>. Acessado em: 15 de abril de 2020.

Souza, Rafaela, **Redes IEC-61850 - Estudo de Protocolo e Exemplo de Aplicação**, Automação Industrial, 2012. Disponível em <<https://www.automacao industrial.info/redes-iec-61850-estudo-de-protocolo-e-exemplo-de-aplicacao/>>. Acessado em 16 de abril de 2020.

DATA REGENERATION 2R IN OPTICAL COMMUNICATION NETWORK BASED ON MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER WITH ACOUSTIC-OPTICAL FILTER AND HIGHLY NON-LINEAR PHOTONIC CRYSTAL FIBER

Data de aceite: 01/06/2020

Fabio Barros de Sousa

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rua Augusto Corrêa, 01, Belém, Pará, 66.075-110, Brasil.

Fiterlinge Martins de Sousa

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rua Augusto Corrêa, 01, Belém, Pará, 66.075-110, Brasil.

Jorge Everaldo de Oliveira

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Física, Fl. 17, Quadra Especial, Lote Especial, Nova Marabá, Marabá, Pará, Brasil.

Elizabeth Rego Sabino

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Matemática, Fl. 17, Quadra Especial, Lote Especial, Nova Marabá, Marabá, Pará, Brasil.

Marcos Benedito Caldas Costa

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, Rodovia BR-316, km 7, Levilândia, Ananindeua, Pará, 67.000-000, Brasil.

Grupo de Pesquisa em Fotonica e Optica não Linear. <http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupu/8017792785061258>

ABSTRACT: In the present paper a numerical analysis of the performance of all-optical 2R regenerator (Re-amplification and Re-shaping)

based on Self-Phase Modulation (SPM) was carried out through the Mach-Zehnder Interferometer (MZI) communication system with Acousto-Optic Filter (AOF) and Highly Non-Linear Photonic Crystal Fiber (HNL-PCF). The system performance analyzes were performed according to the variation of input power (from -10dBm to 10dBm) and the transmission length (from 120km to 1200km). The results showed that the regeneration scheme 2R proposed here presented values of minimum bit error rate (Min. BER) below the threshold of 10^{-9} and of maximum quality factor (Max. Q-Factor) above the threshold of 6, when compared to a system without regeneration.

KEYWORDS: Regeneration 2R, Self-Phase Modulation, Acousto-Optic Filter, Highly Non-Linear Photonic Crystal Fiber, Mach-Zehnder Interferometer.

REGENERAÇÃO 2R DE DADOS EM REDE DE COMUNICAÇÃO ÓPTICA BASEADA EM INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER COM FILTRO ACÚSTICO ÓPTICO E FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO ALTAMENTE NÃO LINEAR

RESUMO: No presente artigo, realizou-se uma

análise numérica do desempenho do regenerador 2R totalmente óptico (Reamplificação e Reformatação) baseada em auto modulação de fase (Self-Phase Modulation – SPM) através de um interferômetro de Mach-Zehnder com filtro acústico óptico (Acousto-Optic Filter – AOF) e fibra de cristal fotônico altamente não linear (Highly Non-Linear Photonic Crystal – HNL-PCF). As análises do desempenho do sistema foram realizadas de acordo com a variação da potência de entrada (de -10dBm a 10 dBm) e o comprimento da transmissão (de 120km a 1200km). Os resultados mostraram que o esquema de regeneração 2R aqui proposto apresentou valores de taxa de erro de bit mínima (Min. BER) abaixo do limiar de 10^{-9} e de máximo fator de qualidade (Max. Q-Factor) acima do limiar 6.

PALAVRAS-CHAVE: Regeneração 2R, Auto Modulação de Fase, Filtro Acustico Optico, Fibra de Cristal Fotônico Altamente Não Linear, Interferômetro de Mach-Zehnder.

1 | INTRODUCTION

Over the years the scientific community as well as the telecommunications industry have been engaged in designing and deploying ultrafast and high bit rate optical communication systems to meet the growing demand for network flexibility, transparency, low cost, low power consumption and high bandwidth (ALIPOOR; MIR; SHEIKHI, 2018; AZZAM; ALY, 2018; SHARAN et al. 2016). In this sense, it is also expected that these systems will be able to reduce the latency between nodes and regenerate degraded signals due to the noise accumulated during the transmission process.

Several techniques have already been investigated through the design of fiber optic communication systems based on non-linearities such as: Self-Phase Modulation (SPM), Cross-Phase Modulation (XPM), Four-Wave Mixing (FWM) and Cross-Gain Modulation (XGM). Research by Azzam et al. (2018); Hui (2014); Oliveira et al. (2019) and Sousa et al. (2018) demonstrate that these non-linear effects can be induced through the use of HNL-PCF, Dispersion Compensated Fiber (DCF), HNLF and semiconductor optical amplifier (SOA). Interferometer configurations such as Mach-Zehnder, Michelson and Sagnac have been widely used for this purpose, as well as in other applications such as wavelength conversion and remote sensing temperature, strain, mechanical stress and in techniques for obtaining logic gates and signal regeneration in fiber optic communication system (ALMEIDA et al., 2019; AMEL et al., 2015; KAMENEV et al., 2014; SOUSA et al., 2019 and WANG et al., 2016).

Recently, the non-linear effects on optical fibers have been widely studied, such as the effect of FWM in a Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) integration with Radio-over-Fiber (RoF) and optical double-side band modulation (ODSB), which was investigated by Alipoor, Mir and Sheikhi, 2018.

Singh et al., 2017 presented an all-optical up-and down-wavelength converter has been designed and investigated which is based on FWM effect in semiconductor optical

amplifier Mach-Zehnder Interferometer (SOA-MZI) using a bit rate of 60Gbps return-to-zero on-off keying (RZ-OOK) modulated data, in which they obtained optimal Max. Q-factor values.

And Abdollahi et al. 2014 presented the simulation of a photonic data regeneration system with ultrafast and ultra-short Return to Zero (RZ) pulses generated through a link All-Photonic DRoF (AP-DRoF), which was able to perform optical quantization and wavelength conversion with power savings and improved performance.

Here, we investigated numerically the performance of all-optical 2R regenerator based on Self-Phase Modulation through a Mach-Zehnder Interferometer communication system with Acousto-Optic Filter and Highly Non-linear Photonic Crystal Fiber, which was called a 2R-MZI-AOF regenerator. The results of the proposed system are evaluated as a function of Min. BER and Max. Q-factor, optical signal to noise ratio (OSNR), eye height, timing jitter and optical spectrum. The analysis was performed for signal output in the time and frequency domain based on SPM and dispersion. In our work the structure of the 2R-MZI-AOF regenerator was described in the second part and then the analyzes and discussions of the optical pulse results in time and frequency domain were presented in the third part. And in the end the conclusion about the performance of the 2R-MZI-AOF regenerator was presented.

2 | SCHEMATIC OF THE PROPOSED MZI-AOF REGENERATOR

The 2R regenerator proposed here is a pass-through scheme, based on a MZI configuration with one arm containing an AOF and the other arm containing a HNL-PCF. In Fig. 1 a block diagram of the proposed 2R-MZI-AOF simulation configuration is shown, it is a single channel system with externally modulated laser source on a fiber optic link up to 1200km in length 1550nm, which was developed and simulated using the OptiSystem 15.0 software in which the one-dimensional signal flow, the stimulated and spontaneous Raman scattering (SRS), the Kerr non-linearity of SPM and the dispersion were taken into account.

Our regenerator 2R-MZI-AOF was subdivided into three sections: transmission section, degradation section, regeneration section, reception section and fibers section, which will be described next.

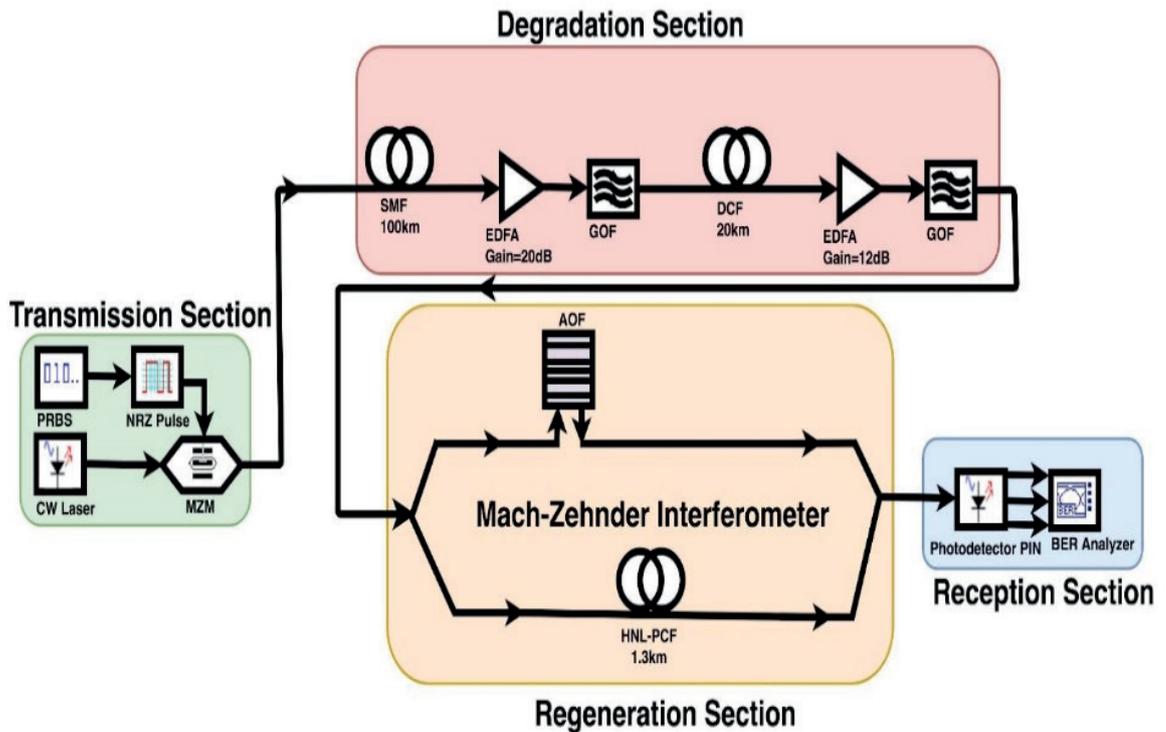


Figure 1 - Schematic of the MZI-AOF based on SPM.

2.1 Transmission Section

The numerical simulations of the proposed 2R-MZI-AOF regenerator were performed at a 10Gb/s transmission rate using a Pseudorandom Bit Sequence (PRBS) generator connected to a non-return-zero pulse generator (NRZ). The power source of the signal was a Continuous Wave (CW) laser with a central wavelength of 1550nm, with initial power of 0dBm and then varied from -10dBm to 10dBm. The amplitude of the signal was electrically controlled by an external Mach-Zehnder (MZM) modulator with extinction ratio of 30dB.

2.2 Degradation Section

The modulated signal emitted by the CW laser was sent to a Single-Mode Fiber (SMF) and then the losses were compensated by an EDFA with gain of 20dB and noise figure of 6dB. The distorted signal due to the ASE noise emitted by the first EDFA was filtered by a Gaussian Optical filter (GOF) with a bandwidth of 500GHz. Chromatic dispersion was compensated using a post-compensation scheme with compensated fiber dispersion (DCF). Another EDFA with gain of 12dB and noise figure of 6dB and another Gaussian filter with bandwidth of 500GHz, again with the objective of rejecting the noise of ASE. In the proposed 2R-MZI-AOF regenerator, we use a loop control to increase the transmission link distance by up to 10 times in order to degrade signal performance.

2.3 Regeneration Section

In order to perform all-optical 2R (Reshaping and Re-amplification) regeneration, we use an interferometric MZI-type wavelength converter with an AOF with 100GHz bandwidth and the same wavelength as the CW laser and a HNL-PCF on the lower arm.

In the regeneration section the signal was divided symmetrically in two paths, using a 3dB fiber coupler. That is, half of the light was injected into the AOF that had the function of selecting the wavelength corresponding to the input signal, where in the region of interaction within the AOF the acoustic field acted on the optical fields converting the polarization signal TE to TM and vice-versa on one of the two output ports of the beam splitter. The other half of the light was injected into the HNL-PCF which produced spectral amplification induced by SPM as a function of the peak power intensity. Subsequently the light beams were recombined in the second 3dB coupler. At the output of the MZI, another additional Gaussian filter with a bandwidth of 62.4GHz was used to perform signal reshaping.

2.4 Reception Section

The signal was received in the reception session by the photodetector PIN which converted the optical bit stream into electrical bit stream and finally a low pass electric Bessel filter with a cut-off frequency of 7.5GHz was used to filter that bit stream. The responsivity of photodetector PIN is 1A/W, and the dark current is 10nA. In order to analyze the optical signal at different stages of the optical link, the optical spectrum analyzer (OSA), the optical time domain visualizer and the BER analyzer were used to evaluate the signal in the time and frequency domain.

2.5 Fibers Section

In the 2R Regenerator design, three types of optical fibers were used, both with non-linear refractive index of $2.6 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ and a reference wavelength of 1550nm. A SMF with attenuation (α) of 0.22dB/km, dispersion (D) of 17ps/km-nm² and dispersion slope (S) of 0.08ps/nm²/km at 1550nm, and core effective area of the fiber (A_{eff}) as 80 μm^2 . The DCF segment used in each span has α of 0.5dB/km, D of -85ps/km-nm, S is -0.45ps/nm²/km and A_{eff} of 30 μm^2 . And a HNL-PCF with α of 9dB/km, D of -0.5ps/km-nm, S of 0.01ps/nm²/km and A_{eff} of 1.81 μm^2 . Initially the total length of the system was segmented into 1:5 and 1:28 ratios, ie 17km DCF and 1.3km HNL-PCF respectively, for 83km SMF.

3 | SIMULATIONS AND DISCUSSION OF NUMERICAL RESULTS

The performance analysis of the 2R-MZI-AOF regenerator was performed through an interactive search of solutions of equation (1) as a function of the variation of the power parameters of the input signal and fiber length. Thus, the initial power of the CW laser was 0dBm and then varied from -10dBm to 10dBm and the transmission length ranged from

120km to 1200km. In this sense the results were collected according to eye diagrams, optical spectra in the frequency domain and time domain waveforms at the exit of each section of the 2R-MZI-AOF regenerator. The values of Max. Q-Factor, Min. BER, eye height, timing jitter and OSNR were the metrics used to determine the performance of the system in order to investigate signal amplitude and phase distortions and the deficiencies caused by SPM and ASE noise in the transmission and reception processes.

Figure 2 shows the NRZ wave form in the time domain with 0dBm output power at the output of the transmitter, at the output of the degradation section (after 1200km transmission length) and in the regeneration section respectively. In figure 2 (b) it is possible to note that the signal has ASE noise, amplitude and phase distortions and also suffered attenuation and dispersion which resulted in loss of power in a good part of the signal.

For the signal of figure 2 (c) showing the waveform after the regeneration section, it is possible to notice a considerable difference in relation to the waveform of the degradation section shown in figure 2 (b), in this case the noises of ASE were filtered by the GOFs and also the signal was reamplified and reformatted, so the regenerated output waveform is almost the same as the input waveform.

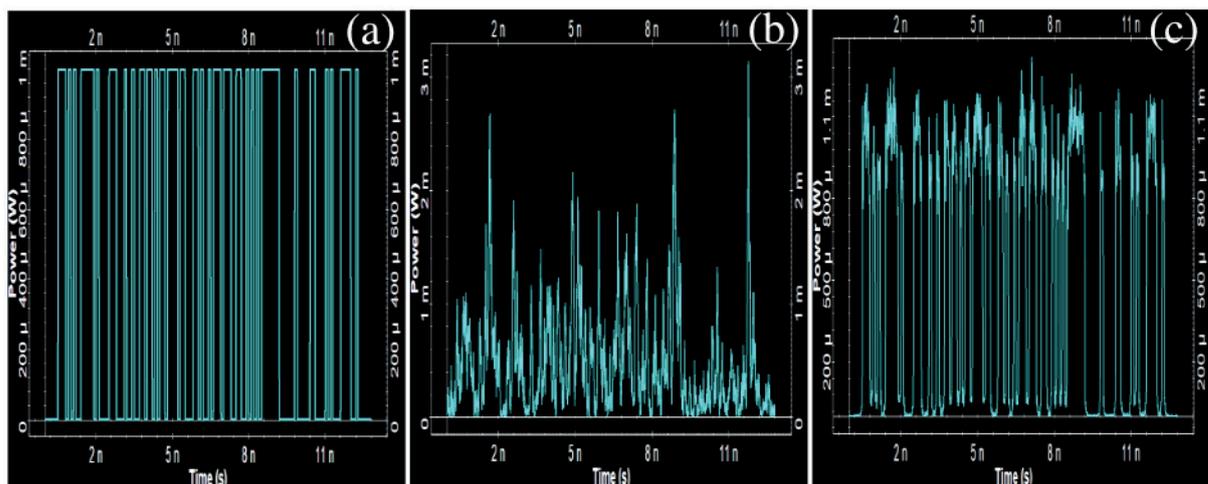


Figure 2 - (a) Initial signal NRZ at the output of the transmitter, (b) Degraded signal at the output of the degradation section and (c) Signal regenerated at the output of regeneration section 2R.

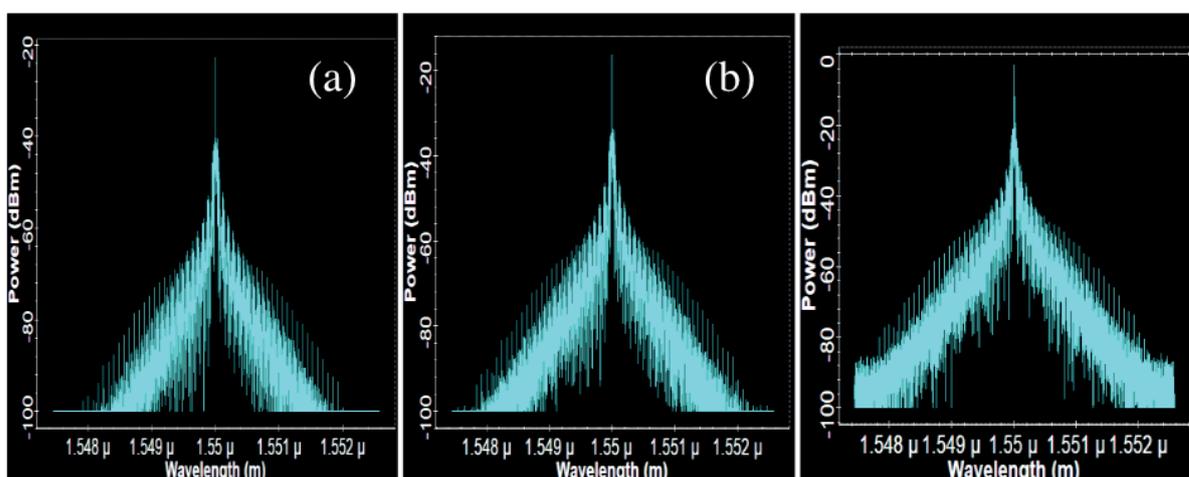


Figure 3 - Optical spectrums at (a), (b), and (c) both after HNL-PCF (signal amplified by SPM induced due to variation of input signal power).

In the spectra after the HNL-PCF shown in figures 3 (a), (b) and (c) it is possible to note that a signal widening occurred due to the increase of the SPM induced within the HNL-PCF as a function of the power increase input. It is clear that the HNL-PCF used has a normal dispersion coefficient ($D < 0$), in this case, it served the purpose of the project, where the amplification in the signal was performed to obtain mutual compensation of Group Velocity Dispersion (GVD) and the non-linear effects of SPM induced.

The spectra after the AOF are shown in figure 4. In this case, a signal amplification occurred as a function of the signal power variation, which influenced the improvement of the Optical Signal Noise Ratio (OSNR) and the timing jitter. Signal Noise Ratio (OSNR) and the timing jitter. Also, the results in the graphs of the eye diagrams of figure 5 presented satisfactory values for the good performance of the 2R-MZI-AOF proposed for the signal after the regeneration, when compared to the values of performance for the signal before the regeneration.

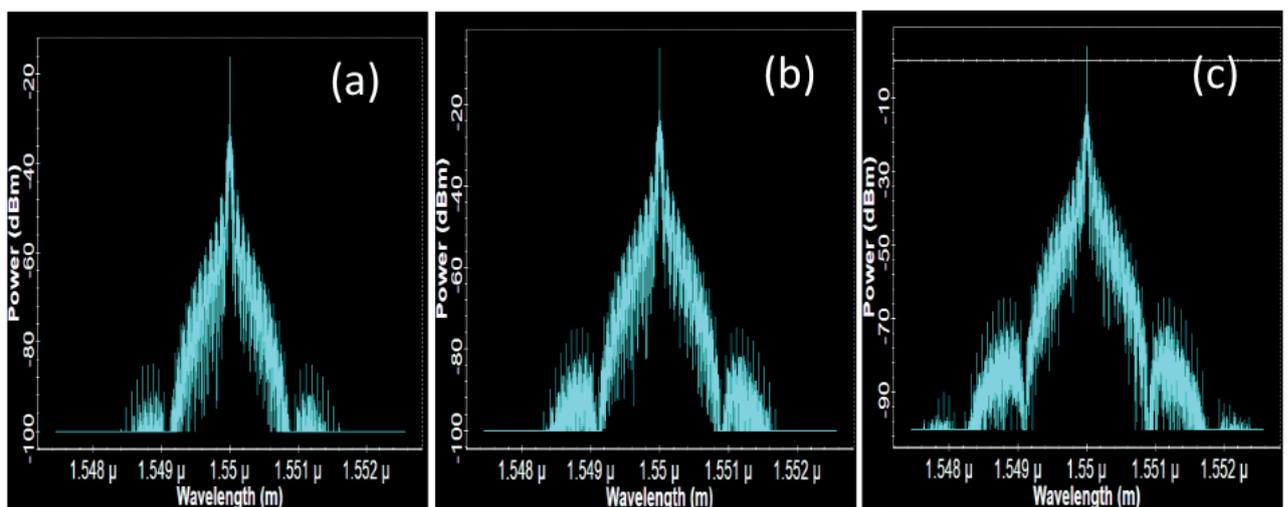


Figure 4 - Optical spectrums at (a), (b), and (c) both after AOF (signal amplified by SPM induced due to variation of input signal power).

3.1 Signal Input Power Impact

The performance of the proposed 2R-MZI-AOF as a function of input power was performed with a 120km transmission length and power was varied from -10dBm to 10dBm. In this case, it was verified that with the increase of the signal power, the performance of the system was compromised, where the quality factor reduced and the bit error rate increased, this was due to the increase in the non-linear effects of SPM which resulted in distortions in the signal.

Figure 5 compares the eye diagrams for the signal at the output of the degradation section and also for the regeneration section as a function of the input power variation. Figure 5 (a) shows that for the input power of -10dBm the Max. Q-factor was equal to 3.7

and the Min. BER was equal to 1.02×10^{-4} . Other low performance values were also found for 0dBm and 10dBm, which obtained values of Max. Q-Factor equal to 4.5 and 5.4 and Min. BER equal to 3.74×10^{-6} and 2.58×10^{-8} in figure 4 (b) and 4 (c) respectively. These results in figures 4 (a), 4 (b) and 4 (c) refer to the performance of the system before 2R regeneration. Therefore, through the use of AOF in the system, the chromatic dispersion of the fiber was attenuated, which consequently reduced the bit error rate and increased the quality factor as shown in the following sections.

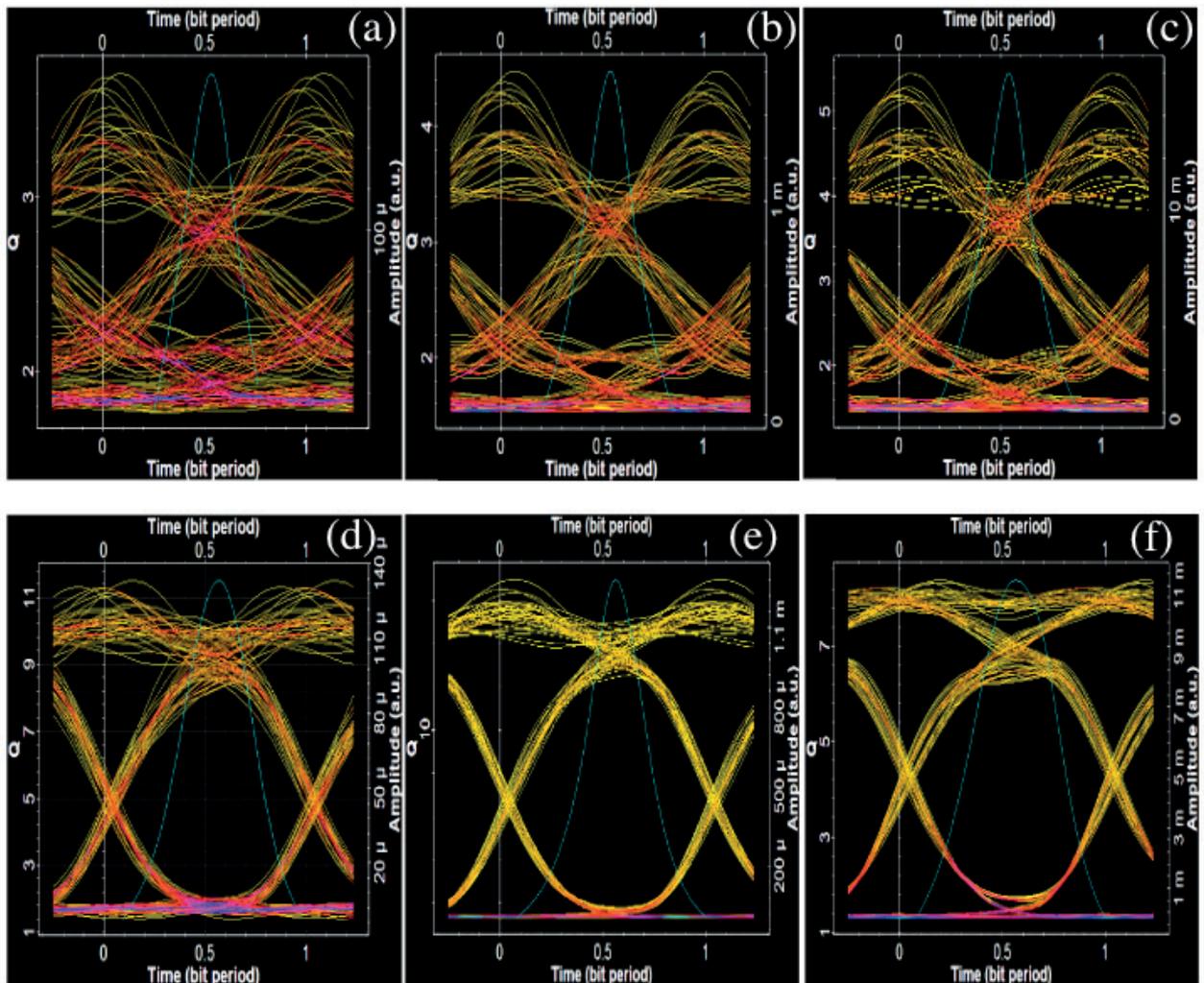


Figure 5 - Eye diagrams at, (a) and (d) - 10dBm input power, (b) and (e) 0dBm input power and (c) and (f) 10dBm input power both before and after regeneration respectively.

However, by comparing with the regeneration session exit eye diagrams shown in figures 5 (d), (e) and (f) it is possible to observe a considerable contrast in the performance results of the system, where the signal from the eye diagram at the output of the regeneration section appear lighter than the eye diagrams of the degradation section. Thus, for the input power of -10dBm the Max. Q-Factor equals 11.5 and the Min. BER equals 6×10^{-31} . For the input power of 0dBm the best performance values were obtained, where the Max. Q-Factor was equal to 17 and the Min. BER was equal to 1.22×10^{-63} . And in figure 5 (f) shows that for the input power of 10dBm the Max. Q-factor was equal to 8.32 and the Min. BER equal to 3.6×10^{-17} .

Therefore, as shown in the graphs of figure 6, it can be stated that with these results the 2R-MZI-AOF regeneration technique proposed here offered better performance for the system, when compared to the system without regeneration, which obtained values of Min BER above the threshold and Max. Q-Factor below the threshold.

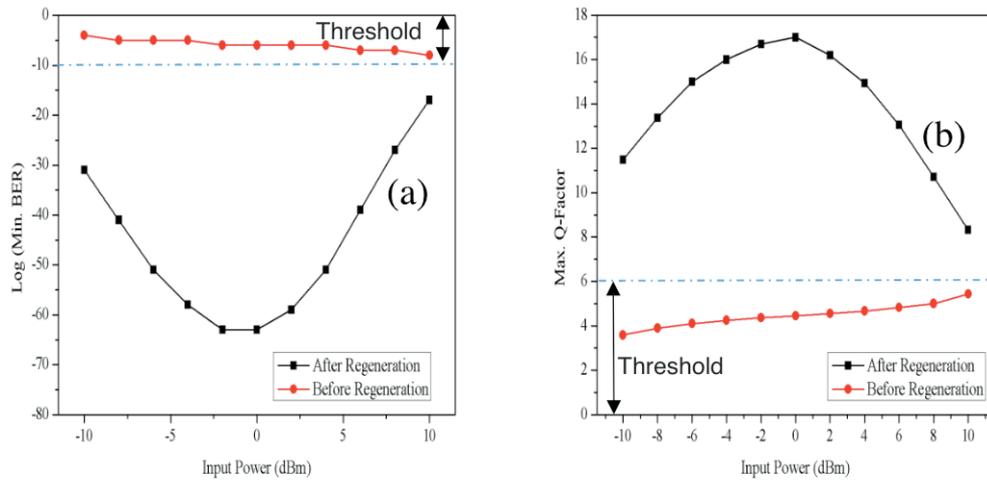


Figure 6 - Measurement Min. BER and Max. Q-Factor for 2R Regenerator in function of input power.

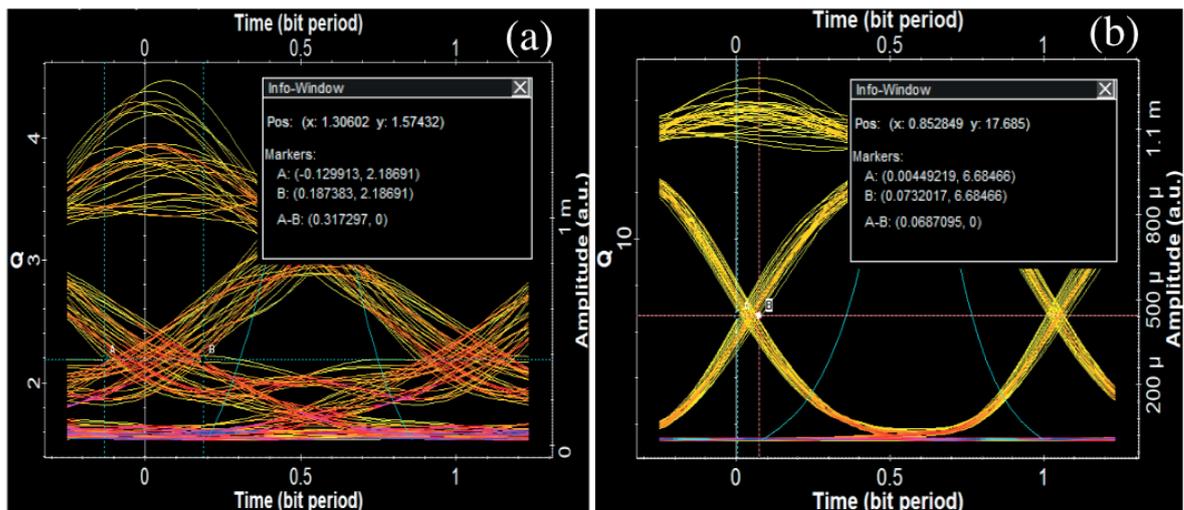


Figure 7 - Timing Jitter for degraded signal (a) and regenerated (b) for input power of 0dBm.

Figure 7 shows the timing jitter of an eye diagram, measured at the cross-point of the eye diagram, as the difference between the time values of points A and B. Figure 7 (a) and (b) show timing jitter for signal before and after regeneration 2R. Thus, we highlight that the simulation results for the input power of 0dBm show that for an ultra- short NRZ pulse with a job cycle of 5% to 10Gbit/s using the proposed 2R-MZI-AOF regeneration system it was possible to obtain a OSNR approximately equal to 43.8dB, reduce the timing jitter by approximately 78.4% and also greatly improve the height of the eye diagram to about 8.2×10^{-4} compared to the height of the eye of the signal without regeneration which was equal to 2.4×10^{-4} .

Obviously, by comparing the results for each individual case it can be stated that by

increasing the power of the signal from -10dBm to 10dBm, the system OSNR decreases, at min. BER increases and the Max. Q-Factor decreases, but the results of the signals regenerated by 2R-MZI-AOF were considered favorable to the good performance of the system.

3.2 Impact of Link Length

We also analyzed the performance impacts of the proposed 2R-MZI-AOF as a function of the length of the SMF and DCF simultaneously. The length of the link was varied from 120km to 1200km for the input power of 0 dBm and with the length of the HNL-PFC fixed at 1.3km. In this sense, in this section, the nonlinear effects such as chromatic dispersion which are dependent on the fiber length is discussed.

Figure 8 shows the eye diagrams of the proposed 2R-MZI-AOF before and after the regeneration section for different fiber lengths with 120km, 600km and 1200km, respectively. Where the Max. Q-Factors before regeneration were 4.5, 0 and 0 and the Min. BERs 4×10^{-6} , 1 and 1. However, for the signal after regeneration the Max. Q-Factors were 17, 12 and 9 and the Min. BERs were 1.2×10^{-63} , 5×10^{-34} and 1.7×10^{-20} . From figure 8 (a), (b) and (c), it is possible to state that, with the increase of the link length, there was a reduction of the system performance for both cases, factor decreased and min. BER increased. However, the results of figures 8 (d), (e) and (f) clearly show that the signal after regeneration has significantly less phase noise and amplitude fluctuation than the signal before regeneration. Therefore, the link with the proposed 2R-MZI-AOF regenerator obtained a significantly better performance than the link without the 2R-MZI-AOF, as also shown in the graph of figure 9.

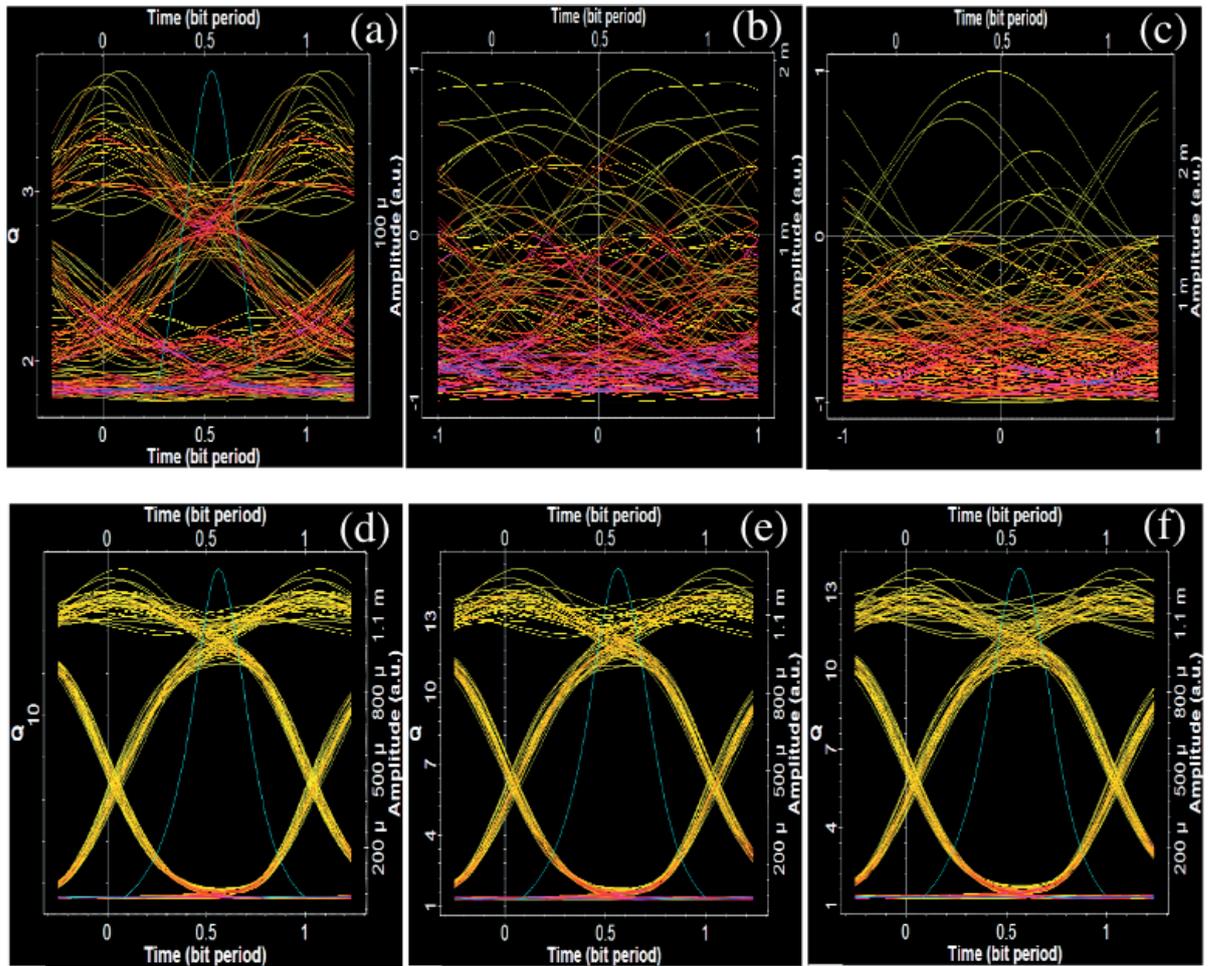


Figure 8 - Eye diagrams at, (a) and (d) 120km fiber length, (b) and (e) 600km fiber length and (c) and (f) 1200km fiber length both before and after regeneration respectively.

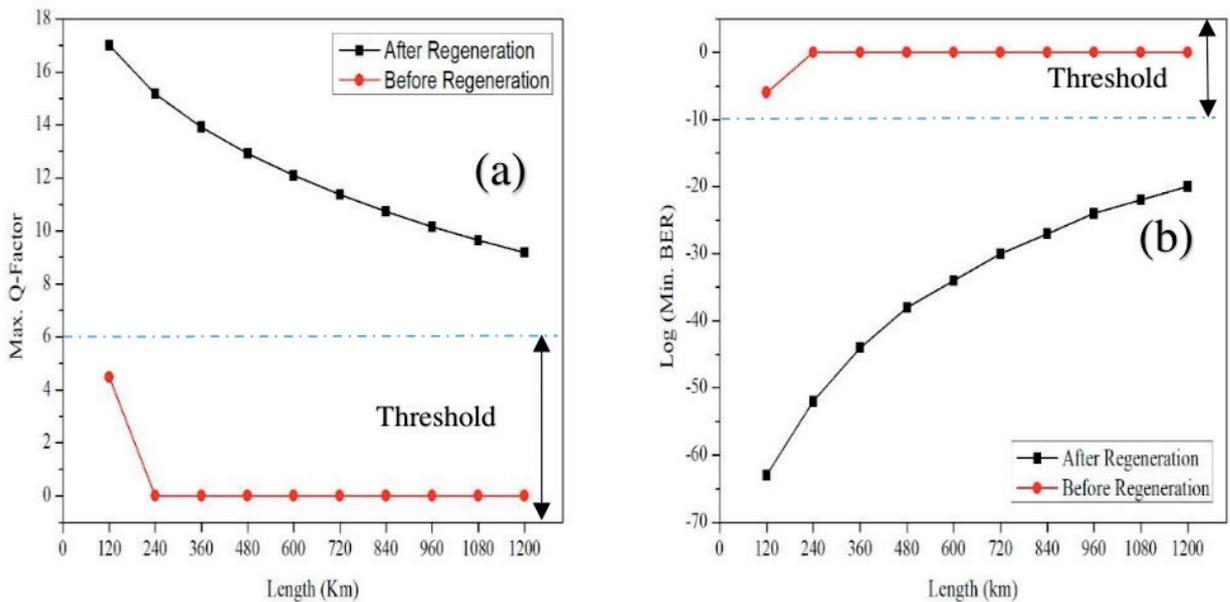


Figure 9 - Fig. 9 Measurement Min. BER (a) and Max. Q-Factor (b) for 2R Regenerator in function of length.

Figure 10 shows the calculated eye plots for the system with and without 2R-MZI-AOF. It was observed that the system with 2R-MZI-AOF obtained values of Max. Q-Factor above the threshold and also values of Min. BER below the threshold for all the measures

of transmission used, so I was able to restore the deficiencies of non-linearity of the optical link and consequently reduced Total Jitter to approximately 85% for the 240km transmission system. The Total Jitter comparison is only possible for the system with a length of 120km and 240km, because for the other values of transmission length the results of this metric becomes impracticable due to signal degradation to the system without the 2R-MZI-AOF.

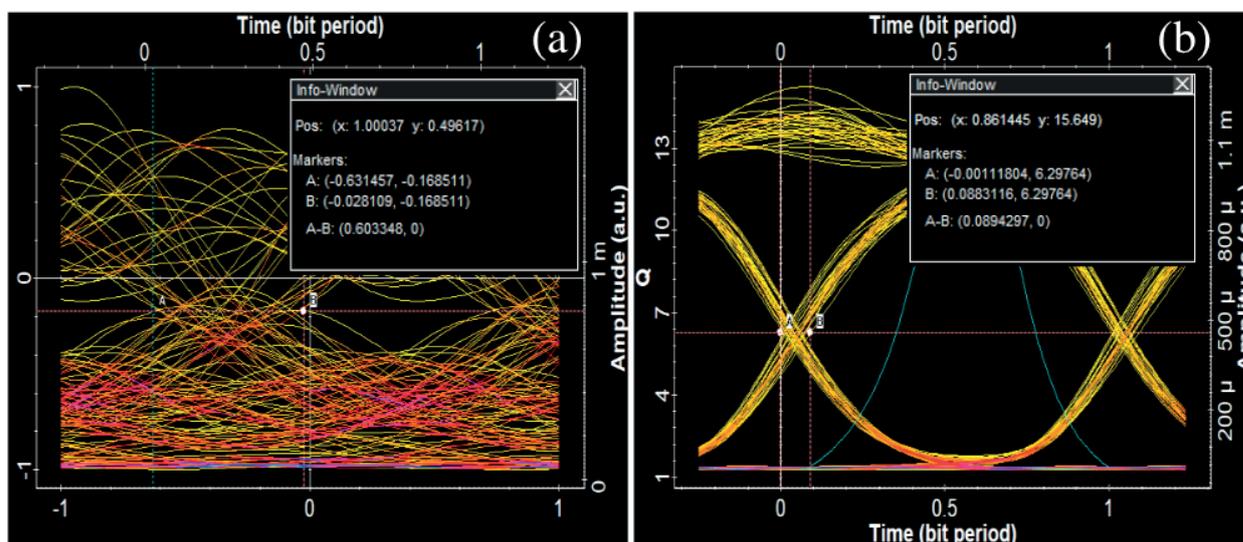


Figure 10 - Timing Jitter for the degraded signal (a) and regenerated (b) for the transmission distance of 240km.

Although OSNR was degraded to 13dB after 120km of transmission to the system without 2R-MZI-AOF, an improvement of the OSNR was achieved to 24.6dB by the 2R-MZI-AOF system. Therefore, the system without 2R-MZI-AOF can be considered as impossible to implement because the performance results were poor, where all the values of the Q-Factor were below the threshold as well as all the values of Min. BER were above the threshold, so from 240km up to 1200km of transmission the eye diagrams presented with heights equal to 0 and completely stressed.

4 | CONCLUSION

We present in this work a all-optical 2R-MZI-AOF regenerator based on SPM, which made the signal more resistant to deterioration and addition of noises. The results of the numerical simulations showed that there was a significant improvement of the signal performance when compared to the results of the system without AOF. The HNL-PCF with only 1.3km in length was able to produce substantial spectral widening through induced SPM. It has also been demonstrated that the PMS phenomenon can be used to achieve all-optical 2R regeneration in systems with 10Gb/s transmission rate through the use of an AOF in an MZI scheme where excellent performance values have been achieved, which proved the feasibility of operating the scheme in a broadband system. Therefore, our

proposed 2R-MZI-AOF regenerator has the following advantages: (1) simple scheme, (2) ease of achieving high performance, (3) high tolerance for signal power fluctuation and (3) error-free detection. In this sense we can say that the 2R-MZI-AOF not only saved power, but also improved the performance and quality of service of the system.

ACKNOWLEDGMENT

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

To the Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém – Brasil.

REFERENCES

- ABDOLLAHI, Seyed Reza; AL-RAWESHIDY, Hamed Saffa; OWENS, Thomas John. Data regeneration for an all-photonic digital radio over fibre. **IET Optoelectronics**, v. 8, n. 6, p. 256-263, 2014.
- ALIPOOR, A.; MIR, A.; SHEIKHI, A. Study of DWDM-ROF link nonlinear effects using direct and external ODSB modulation formats. **Journal of Optics**, v. 47, n. 3, p. 263-271, 2018.
- ALMEIDA, Léo Cesar Parente de ; SOUSA, Fiterlinge Martins de ; SOUSA, Fabio Barros de; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de ; KUMAR, Sandeep ; PASCHOAL JUNIOR, W. G. ; COSTA, Marcos Benedito Caldas . Design and Performance Analysis of All-Optical NAND Logic Gate Using 2-D Photonic Crystal. **Advanced Science, Engineering and Medicine**, v. 11, p. 251-254, 2019.
- AMEL, Mokhdar; MOHAMED, Chikbled. Contribution to the Study of 2R Regenerators in Optical Transmission Link into Account the PMD. **Journal of Control Science and Engineering**, v. 1, p. 1-8, 2015.
- AZZAM, Eman S.; ALY, Moustafa H. FWM in DCF based four-input all-optical NOR/AND gate. **Optical and Quantum Electronics**, v. 50, n. 4, p. 166, 2018.
- HUI, Zhan-Qiang. All-optical 1-to-8 wavelength multicasting at 20 Gbit/s exploiting self-phase modulation in dispersion flattened highly nonlinear photonic crystal fiber. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.
- KAMENEV, Oleg T.; PETROV, Yuri S.; KHIZNYAK, Ruslan V.; ROMASHKO, Roman V. Application of a two-channel fibre-optic Mach-Zehnder interferometer for deformation measurement. **Pacific Science Review**, v. 16, n. 3, p. 167-169, 2014.
- OLIVEIRA, Jackson Moreira; SILVA, Hudson Afonso Batista da; OLIVEIRA, Lelis Araujo de; SOUSA, Fabio Barros de; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de; SOUSA, Fiterlinge Martins de; COSTA, Marcio Benedito Caldas; LUZ, Fabricio Pinho da; COSTA, Marcos Benedito Caldas. New Design of All-Optical Logic Universal NAND Gate Formed by NOT (A AND B) Gates Using Michelson Interferometer Based on Semiconductor Optical Amplifier. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, v. 16, n. 7, p. 2712-2719, 2019.
- SHARAN, Lucky; AGRAWAL, Vaibhav Madangopal; CHAUBEY, Vinod Kumar. Link optimization and performance analysis of a 40 Gbps DQPSK modulated ultra DWDM system with 32 orthogonally polarized channels. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 15, n. 4, p. 349-364, 2016.

SINGH, Surinder; S. Singh, N. Badraoui, T. Berceli, A. Alomainy. Design and analysis of all-optical up-and down-wavelength converter based on FWM of SOA-MZI for 60 Gbps RZ data signal. **Photonic Network Communications**, v. 34, n. 2, p. 288-297, 2017.

SOUSA, Fabio Barros de; SOUSA, Fiterlinge Martins de; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de; OLIVEIRA, Jackson Moreira; PASCHOAL, Waldomiro Jr.; M.B.C Costa. All-Optical 3R Regeneration Based on an Acousto Optical Filter with Q-Factor Improvement. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, 15, n. 6-7, p. 1871-1875, 2018.

_____; OLIVEIRA, Jorge Everaldo de; SOUSA, Fiterlinge Martins de; COSTA, Marcio Benedito Caldas; OLIVERIRA, Osmar Tharles Borges; OLIVEIRA, Jackson Moreira; MARTINS, Elizete Sabino; COSTA, Marcos Benedito Caldas. Michelson interferometer system with acoustic optic filter and fiber Bragg grating for reduction of four-wave mixing. **Scientia Plena**, v. 15, n. 7, 2019.

WANG, Yiqun; PEI, Li; LI, Jing; LI, Yueqin. All optical multi-wavelength single-sideband modulated WDM radio-over-fiber systems by introducing a Sagnac loop filter. **Optical Fiber Technology**, v. 32, p. 36-42, 2016.

PROJETO DE UMA ANTENA PATCH PLANAR UTILIZANDO A SUPER FÓRMULA DE GIELIS

Data de aceite: 01/06/2020

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira

Universidade Estadual da Paraíba

Departamento de Computação

João Pessoa - PB

Pedro Carlos de Assis Júnior

Universidade Estadual da Paraíba

Departamento de Física

Patos - PB

RESUMO: Com o advento das tecnologias de comunicação sem fio (tecnologias 3G à 5G), buscaram-se soluções técnicas que atendam aos mais variados requisitos para aplicações práticas, tais como: serviços militares, aplicações médicas, telecomunicações, aplicações pessoais, etc. Para que isso seja possível se faz necessário à busca por dispositivos que atendam determinados requisitos, sem perda de desempenho e com um custo relativamente acessível. Nesse contexto devido às inúmeras características atrativas das antenas de microfita aliado a utilização de equações polares é possível conseguir diversas geometrias que atendam a diferentes requisitos de aplicações em comunicação sem fio, permitindo assim uma grande flexibilidade

nos projetos de antenas patches para a faixa de frequência das micro-ondas. Outro grande atrativo dessa tecnologia de antenas planares está relacionada à grande variedade de projetos e aplicações que as mesmas são capazes de oferecer, com isso, as pesquisas relacionadas ao campo do eletromagnetismo aplicado vem crescendo com projetos de antenas, fazendo uso além da geometria euclidiana, geometria fractal e mais recentemente de equações polares para projetos bioinspirados.

Esse artigo consiste no projeto e análise por meio de uma caracterização numérica de uma antena patch planar em tecnologia de microfita utilizando a super fórmula de Gielis, fazendo uso direto de equações polares que geram a curva matemática (curva em formato de travesseiro – “Pillow”) que será o elemento irradiante da antena. A estrutura será excitada pela técnica de probe coaxial e o projeto da antena é para a frequência de 2,44 GHz (banda ISM - *industrial, scientific and medical*). O projeto ainda será suportado pelo software *Ansys Designer™*, que implementa o método dos momentos e terá seus diversos parâmetros de espalhamento analisados, dentre os quais se destacam: a perda de retorno (RL), diagrama de radiação (3D), impedância de entrada, coeficiente de onda estacionária (VSWR) e sua largura de

banda (BW).

PALAVRAS-CHAVE: Antenas de microfita, Equação Polar, Super fórmula de Gielis, Comunicação Sem Fio.

ABSTRACT: With the advent of wireless communication technologies (3G to 5G technologies), technical solutions are being sought that meet the most varied requirements for practical applications, such as: military services, medical applications, telecommunications, personal applications, etc. For this to be possible, it is necessary to search for devices that meet certain requirements, without loss of performance and at a relatively affordable cost.

In this context, due to the countless attractive characteristics of the microwaves, combined with the use of polar equations, it is possible to achieve different geometries that meet different requirements of wireless communication applications, thus allowing great flexibility in the design of patches antennas for the frequency range of microwave. Another great attraction of this planar antenna technology is related to the wide variety of designs and applications that they are capable of offering, with this, research related to the field of applied electromagnetism has been growing with antenna designs, making use in addition to Euclidean geometry, fractal geometry and, more recently, polar equations for bioinspired projects.

This article consists of the design and analysis by means of a numerical characterization of a planar patch antenna in microstrip antenna technology using the Gielis super formula, making direct use of polar equations that generate the mathematical curve (pillow-shaped curve) that will be the radiating element of the antenna. The structure will be excited by the coaxial probe technique and the antenna design is for the 2.44 GHz frequency (ISM band - industrial, scientific and medical). The project will also be supported by the Ansys DesignerTM software, which implements the method of moments and will have its various scattering parameters analyzed, among which the following stand out: return loss (S11), radiation diagram (3D), input impedance, voltage standing wave coefficient (VSWR) and its bandwidth (BW).

KEYWORDS: Microstrip antenna, Polar equation, Gielis' superformula, Wireless communication.

1 | INTRODUÇÃO

Sendo a antena um dispositivo eletromagnético capaz de receber e transmitir ondas eletromagnéticas em meios guiados pelo espaço livre, se faz necessária pesquisa envolvendo dispositivos dessa natureza nos mais variados serviços, sejam militares ou mesmo comerciais (BALANIS, 1997). O grande avanço da vida moderna em termos de comunicação, onde tudo ou quase tudo no universo das tecnologias se encontram conectados, aliado ao grande avanço nos sistemas modernos de comunicação sem fio (tecnologias 3G, 4G e 5G, internet das coisas, etc.) e as características como: baixo peso, baixo perfil, eficiência, boas características de radiação e principalmente o custo, tem motivado pesquisadores em centros de pesquisa mundo a fora a buscarem soluções e aplicações nos mais diversos serviços e setores de telecomunicações, dessa forma

alavancando as pesquisas envolvendo o eletromagnetismo aplicado (GARG, et al., 2001).

Uma grande tendência com relevância nas pesquisas atuais consiste no projeto de circuitos/dispositivos de micro-ondas por meio de transformações polares, onde é possível através de uma formulação matemática relativamente simples conseguir novas geometrias capazes de operar em diferentes faixas de frequência no espectro eletromagnético. Nesse contexto, esse artigo se propõe a projetar e analisar numericamente uma nova antena patch de microfita fazendo uso da super fórmula de Gielis por meio de uma equação polar que gerará a curva matemática que será o elemento patch irradiante da antena (GIELIS, 2003). Essa curva gerada pela super fórmula de Gielis apresenta o formato de um travesseiro (ver Figura 2), em virtude disso a antena foi denominada de antena “pillow”, termo em inglês para a palavra travesseiro.

A antena foi projetada para a frequência de Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) de comunicação sem fio em 2,44 GHz. A faixa de frequência de 2,44 GHz foi escolhida em virtude de pertencer a banda ISM (do inglês *industrial, scientific and medical*), o qual é não licenciada e livre para teste das mais diversas aplicações que envolvem sistemas de comunicação *wireless* (sem fio).

A seção II descreve o sistema de equações polares. Na seção III é descrito a metodologia e a estrutura da antena proposta. Os resultados simulados e experimentais são apresentados na Seção IV. A seção V apresenta as conclusões desse artigo.

2 | EQUAÇÕES POLARES

Em matemática, as coordenadas polares são um sistema de coordenadas bidimensional em que cada ponto no plano é determinado por uma distância e um ângulo em relação a um ponto fixo de referência. O ponto de referência (análogo a origem no sistema cartesiano) é chamado de polo (O), e a semirreta do polo na direção de referência é o eixo polar. A distância a partir do polo é chamada coordenada radial ou raio (r), e o ângulo (θ) é chamado coordenada angular, ângulo polar ou azimute.

Um sistema de coordenadas polares (O, r, θ) em um plano consiste de um ponto O , denominado polo, de uma semirreta OA , com origem em O , denominada eixo polar, e de um segmento de reta utilizada para medir a distância de O a um ponto qualquer do plano. Um ponto P do plano é representado em coordenadas polares, conforme indicado na Figura 1(a), através de dois valores, $P(r, \theta)$, em que, r é a distância de P a O ; θ é o ângulo do eixo polar para a semirreta OP . Se $r > \theta$, o ponto (r, θ) situa-se no mesmo quadrante de θ , por outro lado se $r < \theta$, situa-se no quadrante oposto pelo polo, Figura 1(b) (LEITHOLD, 1994).

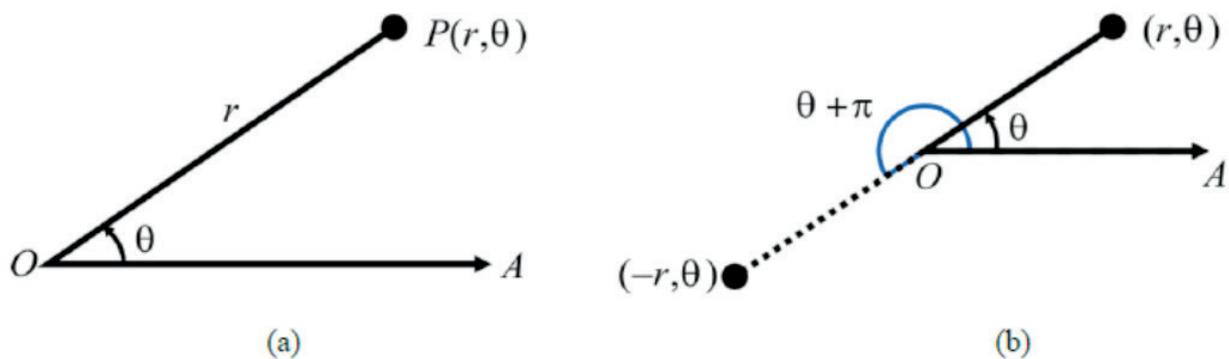


Figura 1 – Sistema de coordenadas polares.

A equação matemática de um ponto descrito como um par ordenado e (r, θ) é conhecido como notação polar, essa equação que gera uma curva polar, que é mais conhecida como equação polar, e um gráfico de uma curva em coordenadas polares é denominado de diagrama polar.

O gráfico de uma equação do tipo polar com $r = f(\theta)$, de uma forma mais geral $f(r, \theta) = 0$, onde f é uma função bem definida e contínua no sistema de coordenadas polares, na qual consiste que qualquer ponto P apresenta pelo menos uma representação polar em função dos pares (r, θ) , satisfazendo dessa forma a equação.

3 | METODOLOGIA EMPREGADA E ESTRUTURA DA ANTENA PATCH PROPOSTA

Por geometria bioinspiradas, podemos entender como toda as formas comumente encontradas na natureza que busca compreendem as mais diversas formas para posteriormente aplicá-los na resolução de problemas eletromagnéticos, por exemplo, projetos de antenas e superfícies seletivas em frequência, com aplicações práticas nas diversas faixas do espectro de frequência.

A curva polar usada para criar o elemento irradiante da antena bioinspiradas proposta (antena *Pillow*) foi gerada por meio da super fórmula de Gielis, do qual a parti dela é possível gerar diversas geometrias denominadas de supercírculos, superelipses e superquadráticos (GIELIS, 2003), segundo dado pela Equação 1:

$$r = f(\theta) = \frac{1}{\sqrt[n_1]{\left(\left|\frac{1}{a}\cos\left(\frac{m}{4}\theta\right)\right|\right)^{n_3} + \left(\left|\frac{1}{b}\text{sen}\left(\frac{m}{4}\theta\right)\right|\right)^{n_3}}} \quad (1)$$

Na equação da super fórmula são considerados diversos valores distintos para as variáveis dos expoentes n_1, n_2, n_3 , além de ser acrescentado um fator divisor de $m/4$ do ângulo correspondente θ , que promove o uso de coordenadas polares em, m , setores

com simetria rotacional, dessa forma sendo proposta uma equação polar para $r(\theta)$, em que n e m pertence ao conjunto dos números reais positivos, com os parâmetros a e b sendo números reais positivos e diferentes de zero.

Para o caso deste artigo na geração da curva *Pillow*, as constantes com seus respectivos valores são: $m = n_1 = 4$, $n_2 = n_3 = 7$, $a = b = 1$. Após a geração da curva, a antena apresentou a seguinte estrutura mostrada na Figura 2 com $L = W = 39,9$ mm.

A análise numérica desse dispositivo foi suportada pelo *software* comercial simulador de onda completa, neste caso foi utilizado o *Ansys Designer™* que implementa o método dos momentos (MoM) na análise precisa dos mais diversos parâmetros espalhamentos associado a antena investigada.

O projeto da antena consistiu na análise de uma antena patch de microfita utilizando a super fórmula de Gielis para a frequência das micro-ondas em 2,44 GHz, com ampla largura de banda, boas características de radiação e sem perda de desempenho, que seja capaz de operar nessa faixa de frequência das micro-ondas, onde temos aplicações em redes de comunicação sem fio (*wireless*) na faixa 2,44 GHz, segundo os padrões: Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n) e Bluetooth (IEEE 802.15).

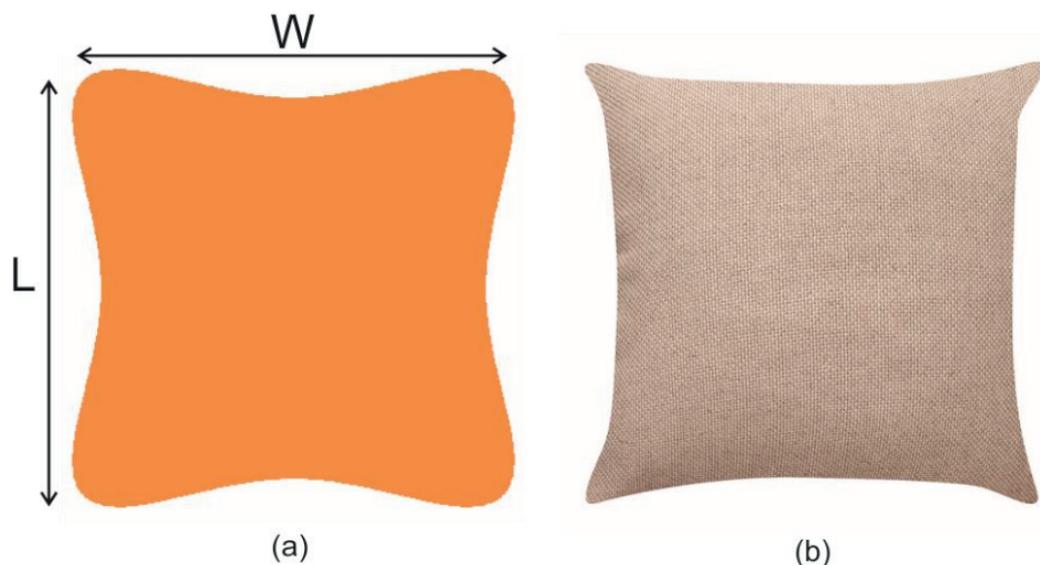


Figura 2 – (a) Antena *Pillow* bioinspiradas proposta; (b) Foto ilustrativa de um travesseiro.

Como parte da metodologia empregada no projeto da antena, foram realizadas uma série de simulações numéricas para o dispositivo proposto, por meio de um simulador de onda completa com a finalidade de investigar o comportamento dos seus diversos parâmetros de espalhamento associados (BALANIS, 1997), (GARG, 2001).

A Figura 3 apresenta a interface gráfica do simulador *Ansys Designer™* utilizado na modelagem da antena aqui proposta nesse projeto de pesquisa. Onde, por meio do simulador foi realizada uma série de simulações numéricas com a finalidade de compreender previamente o comportamento da antena, além de analisar a estabilidade

em frequência do dispositivo e sua viabilidade para aplicações e construção na faixa de frequência de interesse que é a faixa das micro-ondas em 2,44 GHz.

Após a fase de simulação numérica, o dispositivo proposto foi construído e medido em um analisador de rede vetorial modelo N523A da *Agilent Technologies*. A Figura 4 a seguir mostra a fotografia da antena construída e acoplada ao analisador de rede vetorial para caracterização experimental de seus parâmetros eletromagnéticos (parâmetros S) (GARG, 2001).

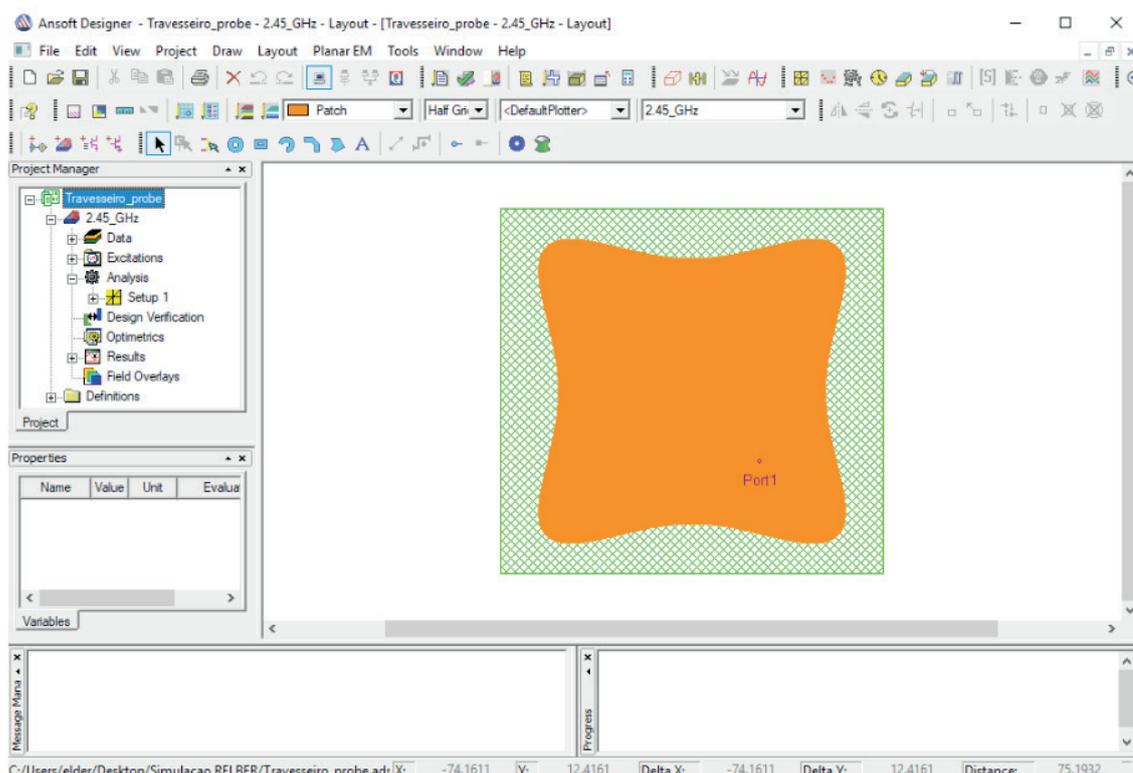


Figura 3 – Interface gráfica do simulado *Ansys Designer*TM utilizado na modelagem numérica da antena *Pillow* proposta.

A excitação da antena foi realizada pela técnica de ponta de prova coaxial (também conhecido por seu termo em inglês *probe coax*) usando um conector SMA de 50 Ω (BALANIS, 1997).

O protótipo foi construído, simulado e medido (ver Figura 4a e 4b), para isso foi utilizada uma placa de circuito impresso de fibra de vidro (FR4), com as seguintes características: espessura ($h = 1,5$ mm), permissividade elétrica ($\epsilon_r = 4,4$) e tangente de perda ($\tan\delta = 0,02$). O conector SMA foi soldado a placa em uma posição adequada, obtida empiricamente por meio de simulações com a finalidade de garantir um melhor casamento de impedância possível, o mais próximo dos 50 Ω desejados e assim maximizar a performance do dispositivo.

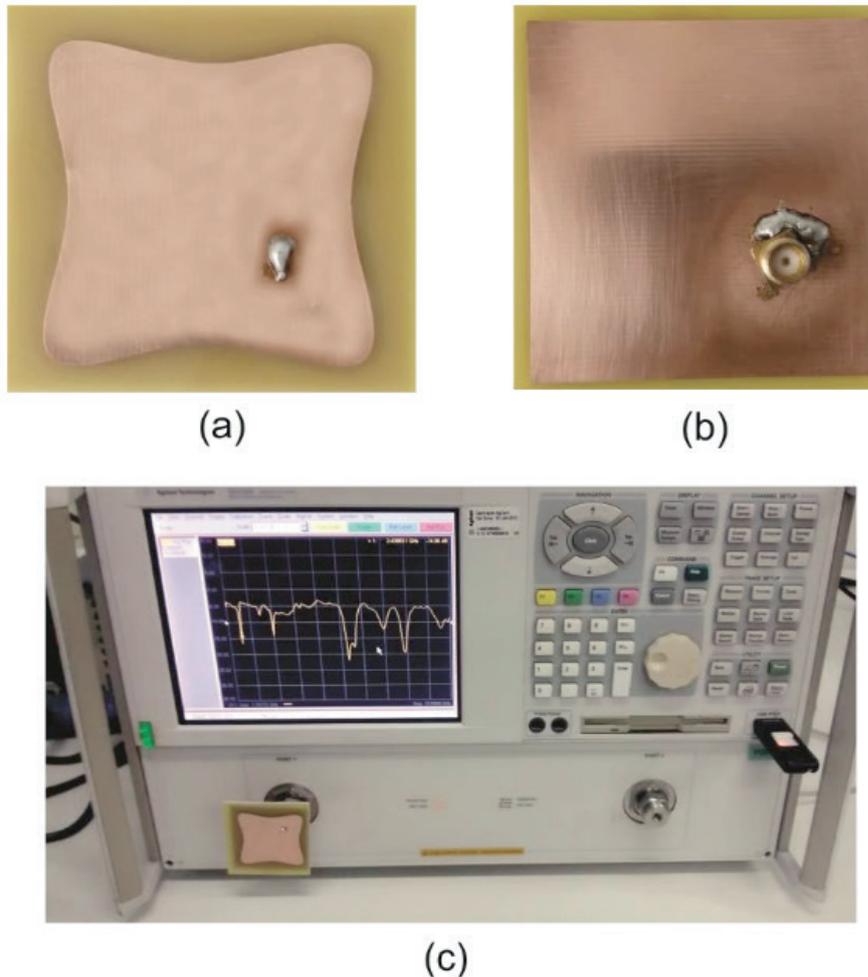


Figura 4 – (a) Vista superior do elemento patch irradiante; (b) vista traseira da antena onde se encontra o conector SMA; (c) antena acoplada ao analisador de rede vetorial.

4 | RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS PARA A ANTENA PROPOSTA

A antena proposta (ver Figura 4a) foi analisada numericamente pelo simulador de onda completa *Ansys DesignTM* e com o intuito de validar o modelo proposto. A estrutura foi construída e caracterizada experimentalmente, onde teve seus mais diversos parâmetros de espalhamento investigados, que são os parâmetros S (BALANIS, 1997), dentre os quais se destacam: a Frequência de ressonância (F_r), Perda de retorno (RL), Largura de banda (BW), largura de banda percentual (BW%), coeficiente de onda estacionária (VSWR) e a Impedância de entrada, obtidos por meio de medições realizadas por um analisador de redes vetorial modelo N523A.

A perda de retorno (RL) no terminal de entrada da antena é definida como sendo a relação, em dB, entre as potências incidente e refletida nesse terminal, onde a mesma pode ser expressa em termos no coeficiente de reflexão (S_{11}), conforme Equação (2).

$$RL = -20 \log |S_{11}| \quad (2)$$

O primeiro resultado desse artigo é mostrado na Figura 5, que ilustra os resultados obtidos para a perda de retorno simulado e medido para a antena Pillow bioinspiradas proposta. É possível observar uma ótima concordância entre os resultados medido e simulado, com baixas perdas de retorno ($RL < -23$ dB) para o resultado medido, o que caracteriza um bom casamento de impedância para essa estrutura, conforme será mostrado e discutido na carta de Smith.

A estrutura apresentou ainda uma frequência de ressonância medida igual a 2,44 GHz, exatamente igual a inicialmente projetada, dessa forma propícia a aplicações em sistemas de comunicação sem fio (*Wireless*). A antena *Pillow* apresentou também um resultado medido para a largura de banda igual a 70 MHz. O resultado simulado apresentou uma perda de retorno ainda mais baixa e igual a -41 dB, porém apresentou também uma largura de banda estreita em relação ao resultado medido, obtendo o valor de 40 MHz.

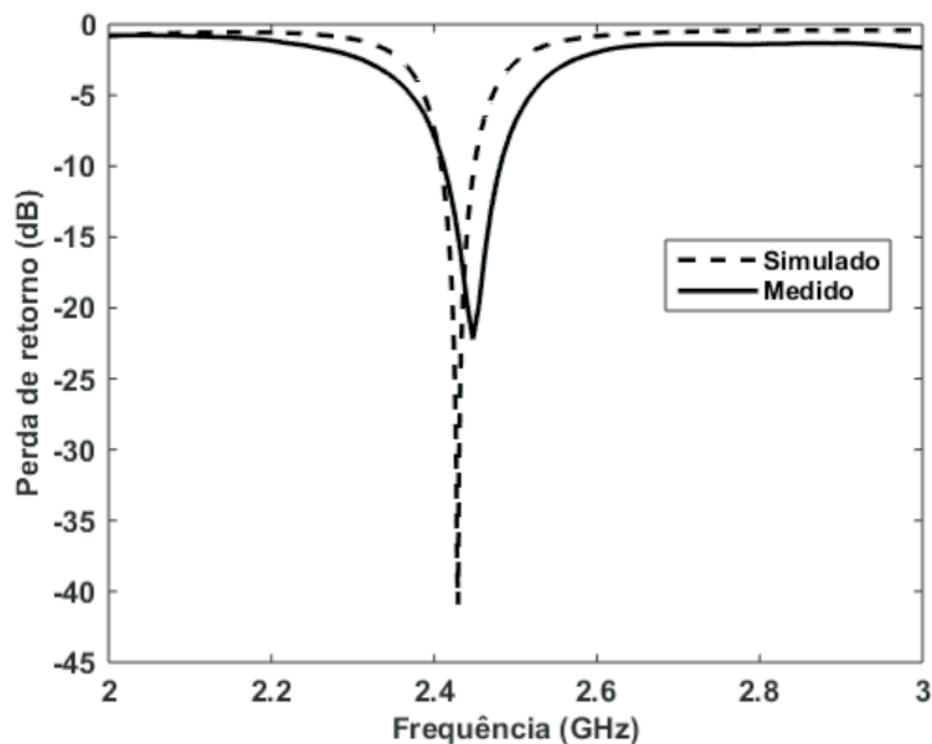


Figura 5 - Comparação entre simulação e medição da perda de retorno para a antena Pillow proposta.

Outro resultado de grande importância em projeto de antenas é o de VSWR. O coeficiente de onda estacionária (VSWR) é um parâmetro que mede o quanto de energia está voltando na linha de transmissão sob a forma de onda estacionária, e a mesma pode ser dada como sendo a relação entre os coeficientes de reflexão das ondas incidentes e refletidas sobre um terminal, conforme mostra a Equação (3).

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (3)$$

A Figura 6 mostra o resultado medido do coeficiente de onda estacionária (VSWR) para a antena *Pillow*, onde podemos constatar um valor medido de 1,18. Este valor se encontra abaixo da condição limite de funcionamento da antena, que corresponde a um valor de VSWR igual a 2,0 para uma perda de retorno igual a -10 dB.

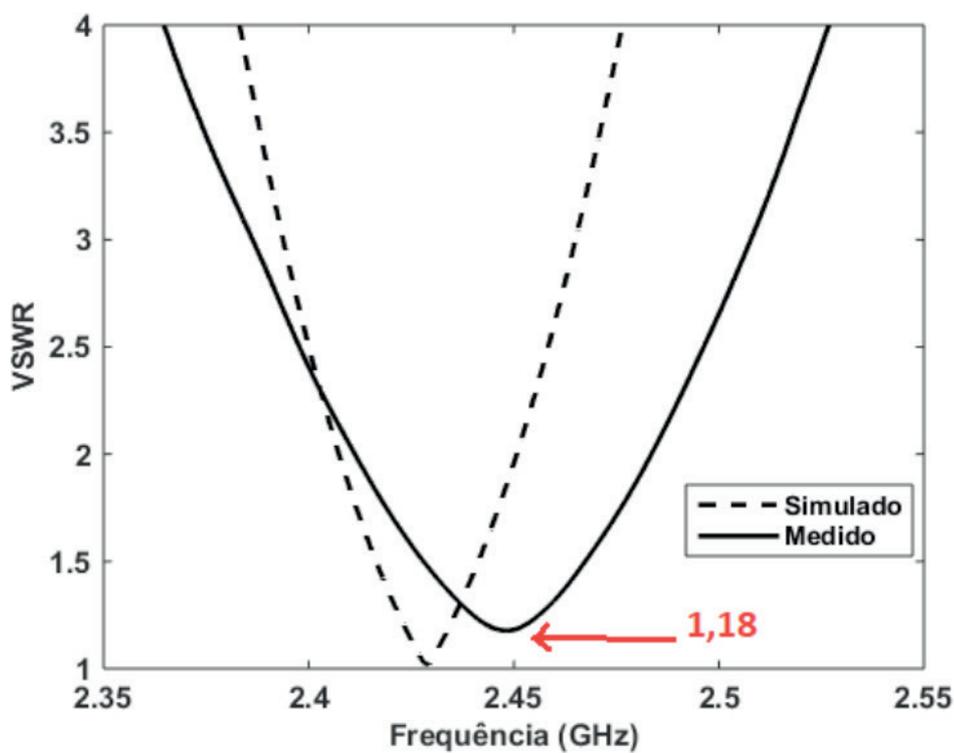


Figura 6 - Curva de VSWR medido e simulado para a antena *Pillow* proposta.

O resultado medido na carta de Smith da impedância de entrada para a antena *Pillow* é mostrado na Figura 7, onde o valor obtido foi de 58,72 Ω , caracterizando assim um bom casamento de impedância para essa estrutura.

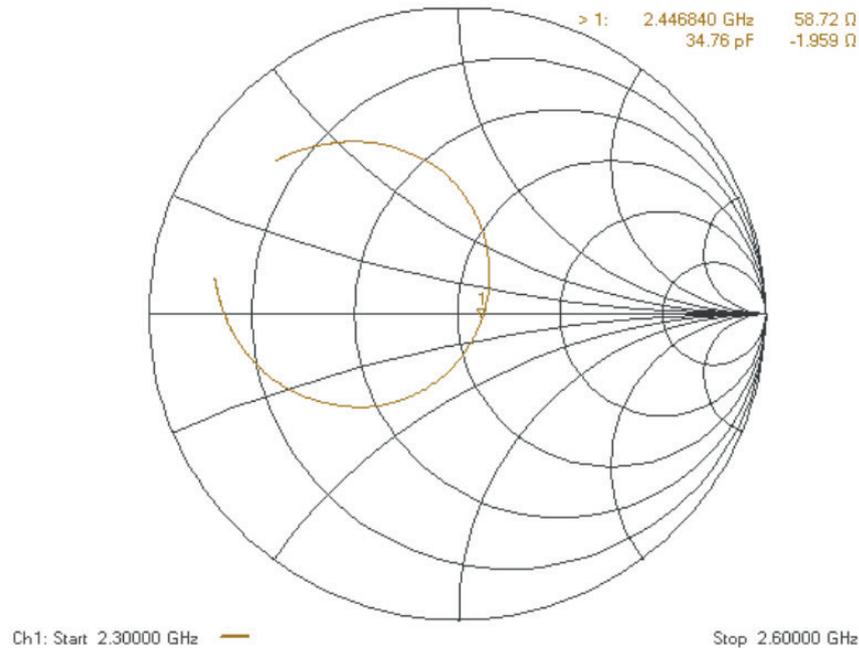


Figura 7 - Impedância de entrada medida na carta de Smith para a antena Pillow proposta.

O diagrama de radiação 3D é mostrado da Figura 8, onde é possível observar um diagrama sem deformações e com características diretivas, apresentando um ganho diretivo de 4,0 dB para a antena na região de campo distante (região de Fraunhofer). O diagrama se apresentou bem-comportado e a priori sem deformações ou algum aspecto que caracterize radiação espúrias em seu formato.

A Figura 9 mostra a distribuição de corrente no patch irradiante da antena *Pillow* proposta. Observa-se uma maior concentração de energia nas 4 (quatro) margens do elemento patch irradiante, o que nos permite concluir que toda a margem da estrutura é responsável igualmente pelo efeito de irradiação da antena, com a energia se distribuindo uniformemente pelo elemento irradiador (patch).

Todos os resultados obtidos para essa antena se encontram resumidos na Tabela 1.

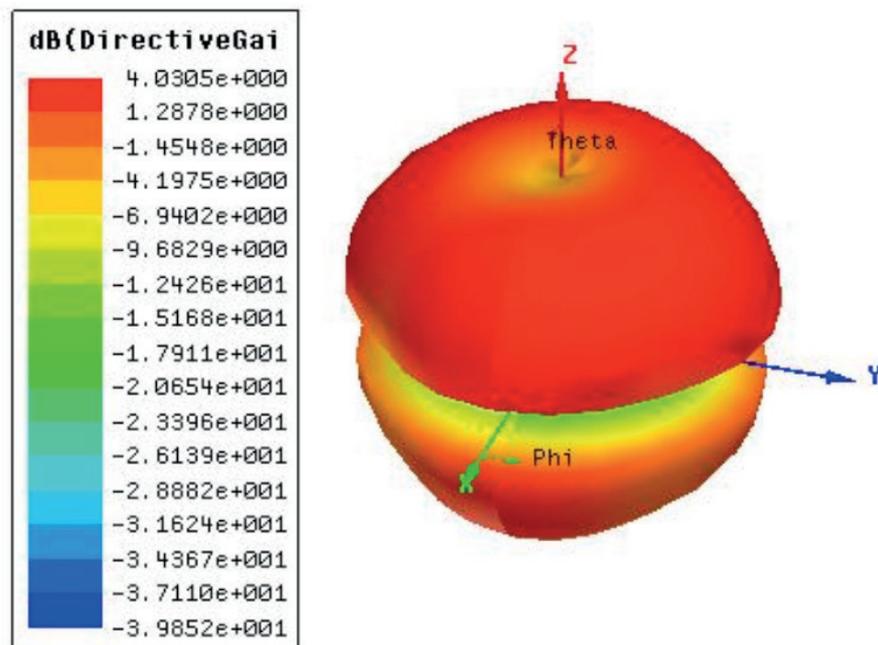


Figura 8 - Diagrama de radiação 3D e Ganho da antena *Pillow*.

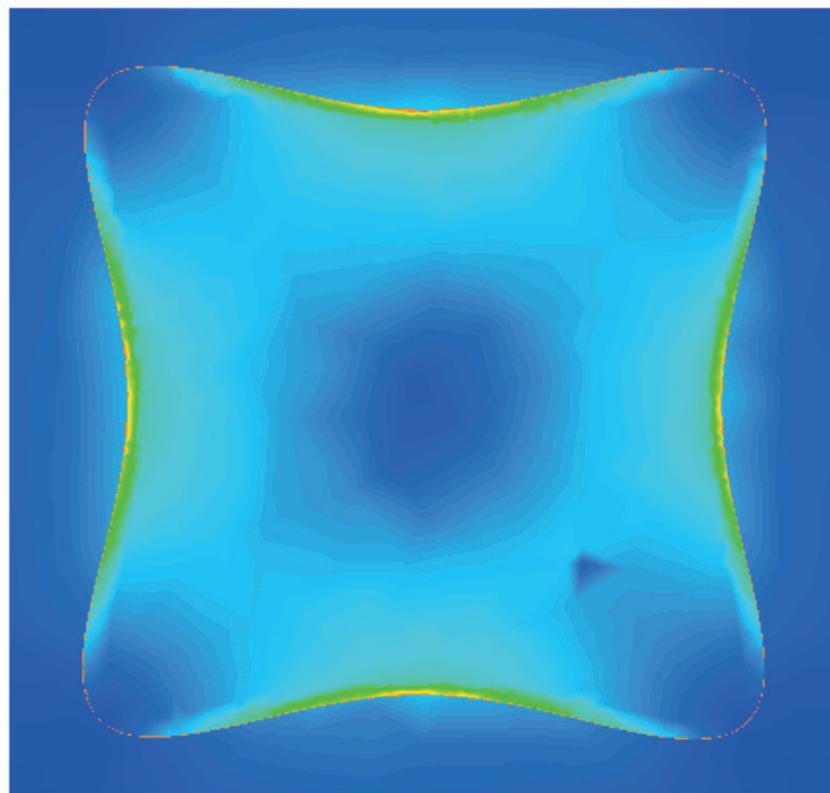


Figura 9 - Distribuição de corrente para a antena patch *Pillow*.

Resultados	Antena Patch Pillow	
	Simulado	Medido
Frequência de ressonância (Fr)	2,43 GHz	2,44 GHz
Perda de retorno (RL)	-41,0 dB	-23,0 dB
VSWR	1,02	1,18
Largura de banda (BW)	40 MHz	70 MHz
Largura de banda percentual (BW%)	1,64%	2,87%
Impedância de Entrada	–	58,72 Ω

Tabela 1 – Resultados simulados e medidos para a antena *Pillow* bioinspiradas proposta.

5 | CONCLUSÃO

Este artigo propôs uma nova antena denominada de antena *Pillow*, gerada por meio da super fórmula de Gielis, onde a mesma foi cuidadosamente projetada para operar na faixa de frequência de 2,44 GHz, onde temos aplicações IEEE 802.11 b/g/n, mais conhecido pela denominação de *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) e aplicações *Bluetooth* (IEEE 802.15). Essa nova estrutura baseada em uma geometria muito próxima a um traveseiro para o projeto do elemento irradiante, foi visando maximizar e potencializar as aplicações desse tipo de estrutura sem perda de desempenho nas faixas de frequências desejadas a aplicações em comunicações sem fio.

A estrutura apresentou boas características de radiação na frequência de 2,44 GHz, com baixas perdas de retorno, a priori sem deformação e com características direcionais, conforme observado pelo diagrama de radiação da estrutura analisada. Uma boa concordância entre os resultados de perda de retorno foi observada assim como o resultado de VSWR para a antena, dessa forma evidenciando um bom casamento de impedância para a estrutura, onde a mesma foi comprovada por medição na carta de Smith na qual foi obtido o valor de 58,72 Ω . Uma boa concordância entre os resultados simulados e medidos foi verificada, validando assim o projeto o projeto da antena proposta.

O ponto negativo observado na execução desse projeto de antena, ficou por conta da largura de banda (BW) da antena, na qual era esperado uma largura de banda mínima de 83,5 MHz necessária a aplicações em sistemas de comunicação sem fio. Diante disso, esperamos evoluir nesse quesito, melhorando esse parâmetro sem degradar a performance da antena.

Como sugestão para trabalhos futuros, os pesquisadores pretendem realizar outros projetos dessa natureza agora agregando dois ou mais elementos irradiantes, formando assim um arranjo de antenas patches *Pillow*, e dessa forma tentar melhorar sua largura de banda e demais parâmetros associados a essa estrutura.

REFERÊNCIAS

LEITHOLD, L. O Cálculo com Geometria Analítica, São Paulo: Harbra, 1994.

BALANIS, C. A. **Antenna theory-analysis and design**, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.

GARG, R.; BHARTIA, P.; BAHL, I.; ITTIPIBOON, A. **Microstrip Antenna Design Handbook**, Boston, USA: Artech House, Inc., 2001.

Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: www.ansoft.com.

GIELIS, Johan. **A Generic Geometric Transformation that Unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes**, American Journal of Botany, vol. 3, n° 90, pp. 333-338, 2003.

PUENTE, C.; ROMEU, J.; POUS, R; CARDAMA, A. **On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna**, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, pp. 517-524, 1998.

OLIVEIRA, M. A. Projeto de Antenas e Superfícies Seletivas em Frequência a Partir de Transformações Polares. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2017.

OLIVEIRA, E. E. C. **Antenas de Microfita com Patch Quase-Fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2008.

MORETTI, Isabella. “Regras da ABNT para TCC: conheça as principais normas”. 2017. Disponível em: <<https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas>>. Acesso em: 26/02/2020.

UMA CONTRIBUIÇÃO NA AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SATISFAÇÃO DO CLIENTE PARA OS SERVIÇOS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS COM EQUAÇÕES ESTRUTURAIS

Data de aceite: 01/06/2020

Data de Submissão: 01/03/2020

Gutembergue Soares da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Departamento de Engenharia de Comunicações
Natal, RN
<http://lattes.cnpq.br/1214925346969928>

André Pedro Fernandes Neto

Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais,
<http://lattes.cnpq.br/6481909544754185>

Fred Sizenando Rossiter Pinheiro

Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Departamento de Engenharia de Comunicações
Natal, RN
<http://lattes.cnpq.br/4302663615185369>

Antonio Salvio de Abreu

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Departamento de Engenharia de Comunicações
Natal, RN
<http://lattes.cnpq.br/4368761407955063>

RESUMO: A medição da satisfação do cliente é uma das questões mais importantes relativas às empresas de qualquer área, o que se justifica pela filosofia de orientação ao cliente e aos

princípios de melhoria contínua, adotadas pelas empresas modernas. O objetivo deste artigo é analisar diferentes modelos de satisfação do cliente de serviços na área de comunicações móveis fundamentado na realização de uma ampla revisão da literatura, explorando a compreensão dos parâmetros de satisfação na oferta dos serviços das organizações. São apresentados modelos conceituais de satisfação e oferecida uma avaliação de diferentes contribuições e pesquisas correlatas às metodologias de medição da satisfação do cliente, com identificação e análise de modelos utilizados em vários países, com aplicação de Modelagem de Equações Estruturais (MEE), suas fundamentações teóricas, principais características e resultados.

PALAVRAS CHAVE: Modelos de Satisfação do Cliente, Comunicações Móveis, Equações Estruturais.

A CONTRIBUTION TO EVALUATION OF
CUSTOMER SATISFACTION MODELS FOR
MOBILE COMMUNICATIONS SERVICES
WITH STRUCTURAL EQUATIONS

ABSTRACT: Measuring customer satisfaction is one of the most important issues relating to

companies in any area, which is justified by the customer orientation philosophy and the principles of continuous improvement, adopted by modern companies. The aim of this article is to analyze different customer service satisfaction models in the mobile communications based on a broad literature review, exploring the understanding of the satisfaction parameters in the services offered by organizations. Conceptual satisfaction models of are presented and an evaluation of the different contributions and research related to the methodologies for measuring customer satisfaction is offered, with identification and analysis of the main models used in several countries, with the application of Structural Equation Modeling (SEM), its theoretical foundations, main characteristics and results.

KEYWORDS: Customer Satisfaction Models, Mobile Communications, Structural Equations

1 | INTRODUÇÃO

A medição da satisfação do cliente é atualmente considerada pelas empresas, como a realimentação mais confiável, tendo em conta que ele oferece de uma forma, direta, significativa e objetiva, informações sobre as preferências dos clientes e suas expectativas. Segundo Gerson (1993) a satisfação do cliente é um padrão de referência de desempenho e um possível padrão de excelência para qualquer organização empresarial. Para reforçar a orientação para o cliente no dia-a-dia, um número crescente de empresas a escolheram a satisfação do cliente como seu principal indicador de desempenho.

Transformações tecnológicas aliadas a um cenário grande competição, formado por empresas de alta tecnologia, caracterizam o setor de comunicações móveis pessoais em todo mundo. No Brasil, a partir da privatização do setor em 1998, **novas concessões**, regulamentos e as privatizações dinamizaram o mercado e afetaram sensivelmente a maneira como as pessoas se comunicam. Em consonância com a importância desta temática, este trabalho busca, retratar o estado da arte e os esforços que foram desenvolvidos, no sentido de estabelecer um arcabouço de referências bibliográficas relevantes, que refletem as principais características dos elementos utilizados para mensuração da satisfação dos clientes.

A pesquisa teórica de satisfação neste contexto está orientada em direção aos modelos de análise visando estabelecer uma perspectiva de compreensão do fenômeno, dos seus e consequentes, no propósito de identificar e representar o processo de satisfação do cliente de serviços de comunicações móveis.

Neste artigo são apresentados os principais modelos de avaliação da satisfação de clientes de comunicações móveis que foram desenvolvidos em vários países, baseados em um conjunto de relações de causa e efeito, por meio da análise e quantificação dos fatores que influenciam a sua satisfação e lealdade. As análises dos modelos de índices de satisfação demonstram que medir a satisfação com objetividade e critério, tem importância vital no processo de tomada de decisões estratégicas das empresas em

qualquer segmento de mercado contribuindo para uma linha de investigação de grande importância acadêmica e mercadológica.

2 | AS DEFINIÇÕES DA SATISFAÇÃO E A RELEVÂNCIA DA SUA MEDIÇÃO PARA A GESTÃO DO CLIENTE

A Satisfação é um dos principais temas abordados nos estudos sobre o comportamento do consumidor, e grande parte dos teóricos desta área defendem a correlação direta entre os índices de satisfação e a lealdade dos clientes, caracterizando-se como resultado mais relevante desta atividade, e serve para interligar os processos que resultam em compra ou consumo com os fenômenos relacionados com a pós-compra, tais como: mudanças de atitude, compras repetidas e lealdade à marca. A medição da satisfação do cliente constitui uma das cinco funções principais da ciência da gestão, permitindo a compreensão, a análise, e a melhoria dos processos (MASSNICK, 1997).

Em termos conceituais, existem inúmeras definições para a satisfação do cliente, atribuídas por diversos autores de diferentes áreas. Todavia, essas definições incluem, usualmente, três elementos característicos: a natureza do estado psicológico; a natureza da experiência e o caráter relativo da satisfação. O primeiro elemento refere-se à avaliação de uma emoção, o segundo remete a um julgamento posterior à compra realizada e o último, traduz o fato de que a avaliação é um processo comparativo (GRIGOROUDIS E SISKOS, 2010).

De acordo com uma abrangente revisão de literatura realizada por Yi (1991), apresentada na Tabela 1, a satisfação do cliente pode ser definida de duas formas básicas: como um resultado, ou como um processo. A primeira abordagem define a satisfação como uma situação definitiva, ou como um estado final resultante a partir da experiência de consumo. A segunda abordagem enfatiza as percepções, as avaliações e o processo psicológico que contribui para a satisfação. As definições de satisfação incluem, usualmente, três elementos característicos: a natureza do estado psicológico; a natureza da experiência e o caráter relativo da satisfação.

O primeiro elemento refere-se à avaliação de uma emoção, o segundo remete a um julgamento posterior à compra realizada e o último, traduz o fato de que a avaliação é um processo comparativo.

Abordagem	Definição	Autor
Satisfação como um resultado	Estado cognitivo do comprador de ser recompensado de forma adequada ou inadequada, pelos sacrifícios a que se submeteu.	Howard e Sheth (1969)
Satisfação como um processo	Uma resposta emocional à experiência proporcionada por determinados produtos ou serviços adquiridos, pontos de venda ou padrões de comportamento, bem como pelo mercado global.	Westbrook e Reilly (1983)
	Um desfecho da aquisição e do uso resultante da comparação do comprador, das recompensas e dos custos da compra em relação às expectativas.	Churchill e Suprenant (1982)
	Uma avaliação processada de que a experiência foi, pelo menos, tão boa quanto deveria ser.	Hunt (1977)
	Uma avaliação de que a alternativa escolhida é consistente com as crenças anteriores, com respeito a essa alternativa.	Engel e Blackwell (1982)
	A resposta do consumidor para a avaliação da percepção da discrepância entre as expectativas anteriores e o desempenho real percebido do produto, após seu consumo.	Tse e Wilton (1988)

Tabela 1 Definições da satisfação do cliente

Fonte: Yi (1991)

Zeithaml *et al.* (2004) e Deng *et al.* (2010) definem satisfação, como uma avaliação feita pelo cliente com respeito a um produto ou serviço do sobre o atendimento de suas as necessidades e expectativas. Segundo Baraniuk (2009), a procura pela satisfação do cliente é abordada na literatura como uma das principais variáveis na influência positiva sobre o cliente e na comunicação boca-a-boca, sendo assim, uma das principais dimensões constituintes dos modelos de lealdade.

Parker e Mathews (2001), no entanto avaliaram que as definições da satisfação como processo concentram-se apenas nos antecedentes da satisfação, ao invés da própria satisfação, *de per si*. Segundo estes autores, a satisfação como um processo é a descrição mais amplamente adotada de satisfação do cliente e vários esforços de pesquisa têm sido direcionados a compreensão da abordagem de avaliação da satisfação.

De acordo com os estudos realizados pela Motorola (1995) e Dutka (1995), as principais razões para medição da satisfação do cliente podem ser assim resumidas:

- A satisfação do cliente constitui a informação mais confiável do mercado, sendo capaz de identificar oportunidades de mercado em potencial e projetar seus planos futuros.
- Os principais princípios de melhoria contínua exigem o desenvolvimento de um processo específico de medição de satisfação do cliente, de maneira que qualquer ação de melhoria deve ser baseada em padrões que considerem as expectativas dos clientes e suas necessidades.
- A medição da satisfação do cliente pode ajudar as empresas a entender o com-

portamento do cliente, e em particular, a identificar e avaliar suas as expectativas, além das suas necessidades e desejos.

Segundo Dutka (1995), as vantagens mais importantes de uma pesquisa de medição da satisfação do cliente podem ser assim sintetizadas:

- Possibilitar a melhoria da comunicação com a clientela total, desde que os programas desenvolvidos para este fim, constituam esforços contínuos e sistemáticos da empresa.
- Oferecer a as empresas possibilidade de examinar se os serviços prestados cumprem as expectativas cliente. Além disso, é possível examinar, ainda, se as novas ações, esforços e programas têm impacto sobre a clientela.
- Promover a identificação das dimensões críticas da satisfação que devem ser melhoradas, bem como as formas por meio das quais esta melhoria pode ser alcançada.
- Determinar os pontos fortes e fracos mais importantes da empresa, em relação à concorrência, com base nas percepções e julgamentos do cliente.

Destacamos que, a despeito de várias pesquisas demonstrarem a existência de uma correlação significativa, entre os níveis de satisfação do cliente, lealdade e lucratividade, deve ser mencionado a ressalva, manifestada por Dutka (1995) que, embora a satisfação do cliente seja uma condição necessária, não é uma condição suficiente para assegurar a viabilidade econômica da empresa.

3 | METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO DA SATISFAÇÃO

3.1 Modelos de Desconfirmação de Expectativas

Avaliações de clientes em relação a um conjunto de atributos de produtos ou serviços, não explicam por que um atributo em particular é considerado importante (ou sem importância) e por que seu nível de desempenho é considerado excelente (ou péssimo). Esta abordagem focada no desempenho não é capaz de revelar os meandros psicológicos que o cliente realiza para proceder a avaliação do produto ou serviço de uma empresa. Esta lacuna relevante na análise do desempenho da satisfação do cliente é enfatizada por diversos pesquisadores que argumentam que os níveis de desempenho existem apenas como estímulos externos para os consumidores (OLIVER, 1977). A abordagem da psicologia e a análise comportamental do consumidor se apoiam na suposição de que satisfação é uma condição mental do cliente.

Modelos comportamentais alternativos tentam descrever e explicar o que acontece exatamente nessa caixa preta, a fim de desvendar o processamento do desempenho futuro do cliente. A natureza dos padrões de comparação usada nestes processos de julgamento da satisfação do cliente tem recebido crescente atenção de pesquisadores, nos últimos anos. Uma definição típica da satisfação é focada nas expectativas dos

clientes como o principal padrão de comparação.

Para Woodruff e Gardial (1996), existem vários padrões de comparação utilizados pelos clientes, que podem variar entre os estágios de um processo de consumo, envolvendo a pré-compra, a compra, o uso e o descarte. Estes diferentes padrões de comparação podem levar a julgamentos de satisfação completamente diferentes.

No contexto do comportamento do consumidor, a teoria mais relevante para a análise de satisfação do cliente, remete à abordagem de Oliver (OLIVER, 1980; CHURCHILL e SUPRENTANT, 1982). De acordo com esta abordagem metodológica específica, a satisfação, pode ser definida como uma experiência de prazerosa de pós-compra, de um produto ou serviço, dada a expectativa do cliente antes da compra. O processo de julgamento do desempenho feito pelos clientes é apresentado na Figura 1, na qual pode ser observado que as percepções de clientes desempenham o papel mais importante no processo de formação da satisfação.

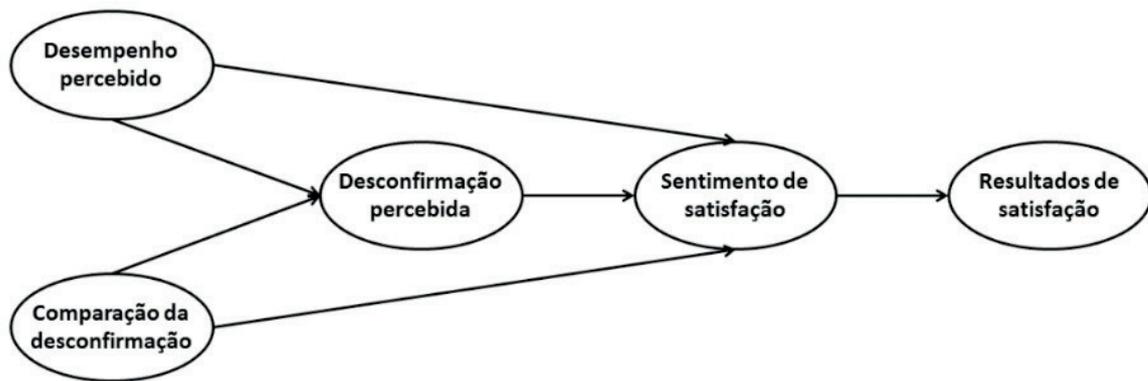


Figura 1-Modelo de desconfirmação de expectativas

Fonte: Adaptado de Woodruff e Gardial (1996)

O desempenho percebido não é necessariamente o mesmo que o desempenho real, sendo comparado com um padrão que pode se referir às expectativas do cliente ou a outros padrões de comparação, conforme mencionado anteriormente. Comparações anteriores resultaram em desconfirmação, pela diferença entre o que era esperado e o que foi recebido. A satisfação é a avaliação ou sentimento que resulta do processo de desconfirmação. Como menciona Woodruff e Gardial (1996), não há uma comparação em si, mas de fato uma resposta do cliente à comparação, dado a componente emocional da satisfação.

O processo de comparação do cliente acima referido, dado às suas expectativas, é o conceito central desta metodologia de avaliação. A existência de uma zona de indiferença é um aspecto importante do processo de desconfirmação de expectativas, uma vez que sua existência sugere que o desempenho e o nível de desconfirmação não são proporcionalmente relacionados.

Esta zona delineada na Figura 2, que segundo Anderson (1973), é também chamada de atitude de aceitação na teoria da assimilação de contraste, indica que a partir da perspectiva do consumidor, pode haver alguma latitude em que o desempenho do produto ou serviço pode variar, mas este ainda cumpre o atendimento das necessidades do consumidor.

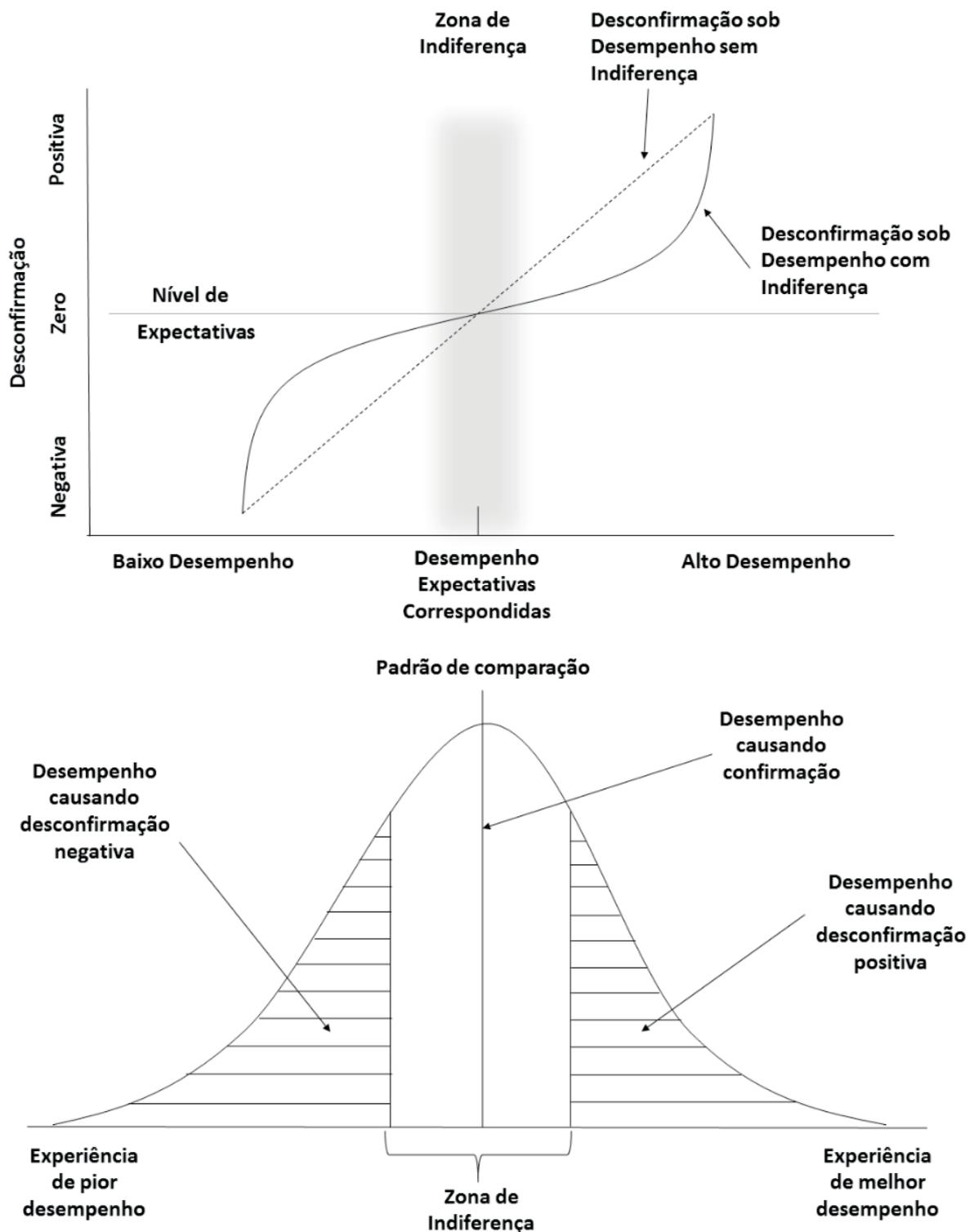


Figura 2-Zona de indiferença na desconfirmação de expectativas

Fonte: Oliver (1997)

3.2 O modelo de Fornell, outras técnicas de avaliação da satisfação e modelos comportamentais

O modelo de satisfação de Fornell explorado em Johnson e Fornell (1991) e Anderson e Fornell (1991), constitui a base de todo processo de medição e da ferramenta de análise utilizada, tanto para o Índice de Satisfação do Cliente Americano (ACSI), como para o Índice de Satisfação do Cliente Sueco (SCSB).

Esta abordagem particular é baseada em um modelo econômico estrutural que relaciona as diferentes medidas de satisfação dos clientes (expectativas, lealdade, reclamações, etc), com fórmulas específicas e pré-definidas. Dadas essas relações estabelecidas entre as variáveis consideradas, o modelo produz um sistema de relações de causa e efeito. Usualmente, as variáveis do modelo são analisadas segundo três aspectos principais: as causas de satisfação, a satisfação propriamente dita e os resultados desta satisfação. Uma das suposições mais importantes do modelo é a de que a satisfação do cliente possui três antecedentes: a qualidade percebida, o valor percebido e as expectativas deste cliente. No tratamento do problema da análise de satisfação do cliente, uma ampla variedade de modelos da psicologia social e análises de comportamento do consumidor têm sido intensivamente utilizadas. Uma das categorias mais importantes destas abordagens refere-se a teorias motivacionais.

Além do modelo da desconfirmação das expectativas e dos modelos de equações estruturais, existem uma grande variedade de diferentes modelos orientados para medições para tratar o problema avaliação da satisfação do cliente. Estas técnicas focalizam a medida de avaliação de uma satisfação global, a análise de associações entre diversas normas de satisfação, e a classificação de clientes em distintos segmentos. Para Grigoroudis e Siskos (2002b) as abordagens de mensuração mais relevantes são classificadas em:

- Técnicas estatísticas de análise de dados: estas abordagens consistem em vários métodos estatísticos tradicionais, como: regressão múltipla, regressão logística, análise fatorial, modelos log-linear, análise discriminante, análise de agrupamentos, métodos probabilísticos e as análises de estatística descritiva.
- Abordagens de qualidade: incluem, principalmente, os modelos de Qualidade Total, além do Servqual e Servperf, que enfatizam a ligação com os principais princípios de gestão da qualidade total, não sendo centradas no processo de medição da satisfação do cliente;
- Análises comportamentais do consumidor: Estas abordagens envolvem o modelo de desconfirmação de expectativas, juntamente com outras teorias comportamentais (motivação, equidade, e teoria de lamentações), que mais explicam e analisam comportamento dos consumidores do que realizam uma medida de sua satisfação;
- Outras abordagens metodológicas: Esta categoria inclui o modelo Kano (Kano,

1984) e outros métodos quantitativos (envoltória de dados, análise de escala multidimensional), bem como a análise da lealdade do cliente, que pode ser considerada como uma extensão do problema da satisfação deste cliente.

4 | OS RELACIONAMENTOS DA SATISFAÇÃO DO CLIENTE NO SETOR DE SERVIÇOS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Leelakulthanit e Hongcharu (2011) investigaram os determinantes da satisfação do cliente através de entrevistas com 400 usuários de comunicações móveis na Tailândia. O estudo constatou que o valor promocional, a qualidade de serviço ao cliente em lojas de atendimento e a imagem corporativa desempenham um papel importante na determinação da satisfação do cliente. No mesmo contexto, Alom *et al.* (2010) entrevistaram 60 estudantes universitários em Bangladesh, que também eram usuários de serviços de comunicações móveis, para identificar os fatores determinantes na escolha de operadoras de serviços móveis. Os resultados desse estudo revelaram que dois fatores, a imagem de marca e a percepção relativa à taxa de chamadas completadas, têm mais influência na decisão dos clientes na seleção de uma prestadora de serviços móveis, em Bangladesh. Na Holanda, Bugel *et al.* (2010) analisaram o compromisso com empresas de comunicações móveis, com um modelo de investimento psicológico do cliente. O estudo examinou as relações entre cliente-empresa em cinco setores: bancário, seguro de saúde, supermercados, operadoras de telecomunicações móveis, e indústria automotiva. No que diz respeito à satisfação, o resultado do estudo sugere que a satisfação desempenha um papel importante na determinação do compromisso do cliente para com os prestadores de serviços, havendo uma correlação positiva entre a melhoria da satisfação do cliente e o ganho de sua lealdade para com a empresa.

Por outro lado, Sadia *et al.* (2011), analisaram a lealdade do cliente no setor de telecomunicações no Paquistão, com uma pesquisa que envolveu 146 usuários de comunicações móveis. Entre as conclusões do estudo estão descobertas que a lealdade do cliente é formada, principalmente, pelos fatores, confiança, qualidade de serviço, lealdade e custos de mudança.

A importância da qualidade do serviço na decisão de escolha de uma operadora de telefonia móvel também foi enfatizada por Rahman *et al.* (2011), que realizaram um estudo com 400 clientes de telecomunicações móveis de grandes cidades na Malásia. Este estudo concluiu que a qualidade da rede é um dos fatores mais importantes na qualidade geral do serviço e constatou que o preço desempenha um papel importante nos critérios de escolha de dispositivos móveis nas operadoras de telefonia móvel da Malásia.

De modo semelhante, o impacto da qualidade do serviço na satisfação do cliente foi confirmado por um estudo realizado por Omotayo e Joachim (2011) com 148 assinantes das principais empresas de telecomunicações na Nigéria. Eles concluíram que a qualidade

do serviço tem um impacto positivo na satisfação e na lealdade. Para identificar o impacto de fatores relacionados ao serviço oferecido na satisfação do cliente, na intenção de recompra e na recomendação de um serviço a outras pessoas, Eshghi *et al.* (2008), pesquisaram uma amostra de 238 usuários de comunicações móveis, em quatro grandes cidades da Índia. Eles descobriram que, os indicadores mais significativos da satisfação do cliente são: competitividade, qualidade relacional, confiabilidade, reputação, recursos de suporte e qualidade de transmissão.

Outros estudos revelaram que satisfação na área de comunicações móveis é determinada por fatores como a qualidade de chamadas de voz, a área de cobertura móvel e o processo de reclamações de clientes (KIM, *et al.*, 2004). No setor de telecomunicações, uma consequência importante da satisfação do cliente pode ser a sua retenção, que determina o sucesso da sobrevivência das operadoras de serviços de comunicações móveis. Isso decorre, certamente, da acirrada concorrência deste mercado, do elevado custo de captar novos clientes e da semelhança entre os serviços oferecidos pelas operadoras (NESLIN *et al.*, 2006).

Fazlzadeh *et al.* (2011) estudaram a retenção de clientes a partir de uma dimensão de lealdade, examinando as relações entre qualidade do serviço, imagem corporativa, satisfação e lealdade, no Irã, por meio de uma coleta dados de 417 clientes de uma operadora de comunicações móveis daquele país. Os resultados revelaram que a satisfação do cliente desempenha um papel importante na mediação relações entre qualidade de serviço, imagem corporativa, valor percebido e a lealdade.

Ahmad *et al.* (2010), pesquisaram a retenção de clientes, como consequência da qualidade dos Serviços de Mensagens Curtas (SMS), avaliando 331 estudantes universitários, que usam SMS de qualquer empresa de comunicações móveis no Paquistão. Seus resultados indicam que a qualidade do serviço tem relação significativa com a retenção de clientes. Em todos os estudos acima mencionados, pode-se observar que a satisfação do cliente tem um efeito direto sobre o desempenho financeiro de uma empresa, como consequência da direta da sua retenção.

5 | PRINCIPAIS MODELOS DE AVALIAÇÃO DA SATISFAÇÃO EM COMUNICAÇÕES MÓVEIS COM APLICAÇÃO DE MEE

O foco dos estudos sobre satisfação e lealdade, no setor de comunicações móveis, representa um vasto campo de pesquisa que se notabiliza pelas características de competitividade entre as empresas, que atuam neste segmento. O setor se destaca pela sensibilidade às mudanças na legislação regulatória pertinente e pelas mudanças tecnológicas que alteram, frequentemente, os conceitos de produtos e serviços existentes.

Em todo mundo, as operadoras de comunicações móveis são, permanentemente,

afetadas pela alta competitividade e pela turbulência deste segmento de mercado, que é fortemente influenciado pela evolução tecnológica inerente às redes de telecomunicações. Dessa forma, para sobreviver nesse ambiente, às empresas devem buscar estratégias que implicam na utilização de diferentes ferramentas, para a gestão da satisfação e da lealdade do cliente.

Como parte de uma pesquisa exploratória sobre esta temática, desenvolvida por Silva (2015), apresentamos a seguir uma síntese temporal da realização de investigações relevantes sobre os modelos da satisfação do cliente de comunicações móveis utilizando MEE, mostrando o estado da arte dos principais autores e trabalhos, em vários países, envolvendo as variáveis antecedentes e consequentes da satisfação de clientes, na área telecomunicações. A Tabela 2 explicitada a seguir, destaca o número de construtos propostos para os modelos, a quantidade de hipóteses formuladas, a escala selecionada para a medição das variáveis indicadoras, o tamanho da amostra coletada e o *software* aplicado na estimação dos modelos de pesquisa.

Ano	Autores	País	Assunto Abordado	NC	NH	Escala	TA	MEE Software
2001	Gerpott T. ; Rams W.; Schindler A.	Alemanha	Avaliar a relação entre a retenção de clientes, a lealdade e a satisfação.	10	13	Likert 1-5	266	LISREL
2004	Kim M-K; Park M-C; Jeong D.	Coréia do Sul	Influência da satisfação e barreiras de mudança na lealdade do cliente.	9	13	Likert 1-7	306	AMOS
2006	Turel O; Serenko A.	Canadá	Medida global da satisfação e lealdade, baseado na metodologia do ACSI.	7	11	Likert 1-10	210	PLS Graph
2009	Kuo Y.; Wu C. M.; Deng W.J.	Taiwan	Qualidade de serviços na intenção de pós-compra em serviços de valor adicionado.	4	6	Likert 1-5	387	LISREL
2010	Deng Z.; Lu Y.; Zhang J.	China	Determinantes da satisfação e da lealdade para Serviços de Mensagens Instantâneas	9	9	Likert 1-7	541	LISREL
2010	Lee J.; Mills J.	EUA	Relações entre as percepções e experiências na satisfação de turistas no uso de tecnologia móvel.	5	9	Likert 1-7	241	AMOS
2011	Liu C.; Guo G.Y.; Lee C.H.	Taiwan	Influência das relações entre qualidade e barreiras de mudança na lealdade.	7	7	Likert 1-5	301	LISREL
2011	Dias E.; Consuegra D. M. Esteban A.	Espanha	Efeitos da satisfação e da comunicação boca-a-boca na lealdade à marca de aparelhos móveis.	3	3	Likert 1-7	257	EQS
2012	Uddin M.B.; Akhter B.	Bangladesh	Fatores de influência nos serviços de comunicações móveis.	4	5	Likert 1-7	373	AMOS
2012	Vrnanakis; Chatzoglou Mpaloukas	Grécia	Satisfação do cliente e seus efeitos no desempenho das operadoras dos serviços.	6	10	Likert 1-7	300	AMOS

Tabela 2 – Aplicação de MEE na avaliação da satisfação do cliente em comunicações móveis

NC – Número de Construtos; NH – Número de Hipóteses; TA – Tamanho da Amostra.

Fonte: (SILVA,2015)

Na sequência, é apresentado um resumo de cada um destes modelos, sendo focalizada a estrutura e a fundamentação teórica das propostas, bem como as principais conclusões e resultados destacados pelos pesquisadores, fornecendo uma visão geral para o entendimento da arquitetura destes modelos de satisfação para o mercado de comunicações móveis, destacando seus determinantes e consequentes.

5.1 Modelo de Gerpott, Rams e Schindler (2001)

O objetivo do estudo que formulou o modelo em questão foi o de analisar os níveis, as diferenças e as relações causais entre os construtos retenção, lealdade e satisfação, considerando o segmento de clientes residenciais de comunicações móveis na Alemanha, após o processo de desregulamentação do setor, em que a lealdade do cliente aparece como a variável central.

No modelo proposto, a satisfação do cliente é um fator determinante direto na lealdade, que por sua vez, é um determinante central da sua retenção que está focada na manutenção da relação comercial estabelecida entre um provedor e um cliente. Esta relação de negócios pode ser mantida involuntariamente, porque um cliente pode ser impedido por barreiras de mobilidade de mudança do fornecedor ou pela liberação do tipo de serviço utilizado.

A pesquisa confirma que a lealdade, pode ser considerada como um forte antecedente da retenção do cliente, e que a satisfação deve ser considerada um antecedente da lealdade, ressaltando, porém que, os mais fortes antecedentes da satisfação são: os preços diferenciados e a qualidade percebida. Considerando a circunstância de escassez de pesquisas anteriores sobre temática da retenção, lealdade e satisfação, na área de serviços de comunicações móveis; a proposta formulada neste trabalho gerou uma ampla oportunidade para realização de diversas discussões e avaliações, por outros pesquisadores, de modo a expandir a compreensão sobre os antecedentes e consequentes, da relação contratual estabelecida com provedores destes serviços.

5.2 Modelo de Kim, Park e Jeong (2004)

Este estudo analisa os efeitos da satisfação do cliente e das barreiras de mudança, sobre sua lealdade e as relações estruturais entre esses fatores, no setor de serviços de comunicações móveis coreano. A pesquisa envolve quatro objetivos: primeiro, identificar as variáveis que compõem a satisfação do cliente e as barreiras de mudança que podem influenciar a lealdade dos clientes; segundo, realizar uma análise empírica dos efeitos relativos da satisfação do cliente e das barreiras de mudança, sobre a lealdade do cliente, e as relações causais entre eles; o terceiro, é analisar o efeito de ajuste entre a satisfação dos clientes e lealdade dos clientes, que é produzida pelas barreiras de mudança, por fim,

em quarto lugar; examinar as implicações estratégicas para operadoras de comunicações móveis no esforço de elevar o nível de lealdade dos clientes.

As conclusões iniciais da pesquisa sugerem que as operadoras de comunicações móveis devem maximizar a satisfação de seus clientes, reforçando as barreiras de mudança para elevação da sua lealdade. Em particular, a pesquisa reforça que estas devem se concentrar em oferecer uma melhor qualidade de serviços nas chamadas. As relações interpessoais entre a operadora e o cliente foram identificadas como fatores positivos para a retenção, mesmo quando os concorrentes tentam conquistá-los com preços mais baixos ou ofertas diferenciadas.

Com relação à variável custo, a pesquisa identifica que as operadoras devem desenvolver, continuamente, programas de recompensas que despertem a atenção dos clientes.

5.3 Modelo de Turel e Serenko (2006)

Estudos realizados por vários pesquisadores na área de serviços de comunicações móveis, anteriores aos trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores Turel e Serenko (2006), consolidaram o entendimento de que a medição da retenção e a análise dos fatores que a afetam, são vitais para o sucesso dos negócios de cada produto ou serviço ofertados pelos seus provedores (GERPOTT *et al.*, 2001; KIM *et al.*, 2004).

Com base no modelo proposto o índice de satisfação de jovens canadenses adultos clientes dos serviços de comunicações móveis, foi calculado. No geral, este estudo ofereceu subsídios para prestadores de serviços, agências reguladoras e clientes, e constituiu uma base para uma futura avaliação comparativa do desempenho das operadoras de redes de comunicações móveis, em termos de satisfação e lealdade dos clientes.

Um índice de pontuação para o construto satisfação do cliente, no Canadá (ACSI) foi calculado com base na fórmula sugerida por Anderson e Fornell (2000), por meio de uma adaptação do ACSM para serviços de comunicações móveis, possibilitando sua comparação com os índices de outros setores. Os autores sugerem que esta medida de satisfação pode ser utilizada como um indicador importante de desempenho pode ser utilizado por agências reguladoras e empresas de comunicações móveis. O estudo demonstra ainda, que a adaptação do modelo ACSM descreve adequadamente as percepções e comportamentos dos clientes de serviços de comunicações móveis. Particularmente, sugere que os construtos qualidade e valor, são os principais fatores que afetam a satisfação das pessoas com os serviços móveis. A satisfação, por sua vez, influencia a lealdade. A ligação negativa entre satisfação e reclamação mostra que, quanto mais satisfeito for um cliente, menor propensão tem este para reclamar. Os autores defendem, além disso, que devido ao papel moderador das barreiras de mudança, a lealdade, no contexto dos serviços móveis, não é um construto unificado, mas sim

constituído de pelo menos duas dimensões distintas: reclamação e tolerância à preço.

Apesar da sua contribuição relevante, este estudo apresenta uma limitação importante por considerar uma amostra de dados de conveniência foi utilizada, sendo neste caso, mais adequado, o emprego de amostras aleatórias é necessário para julgar sobre a generalização dos resultados de qualquer empírica investigação.

5.4 Modelo de Kuo, Wu e Deng (2006)

Os objetivos deste estudo são: a construção de um instrumento para medir a qualidade do serviço móvel e dos serviços valor agregado, analisando também, as relações entre a qualidade do serviço, o valor percebido, a satisfação do cliente e a intenção pós-compra. A investigação avalia também, quais as dimensões de qualidade de serviço são significativamente correlacionadas com o valor percebido e a satisfação do cliente. Os resultados forneceram informações de referência para provedores de serviços móveis de valor agregado, para gerenciar melhor a oferta de serviços e a qualidade do seu provimento. Serviços de valor agregado móveis são serviços digitais adicionados a outros serviços de voz, em que os conteúdos incluídos podem ser produzidos por prestadores de serviços de comunicações móveis ou fornecidas por meio de alianças estratégicas com provedores de conteúdo redes de comunicações móveis. Estes serviços incluem jogos, ícones, toques, localização física, mensagens, banco eletrônico, navegação na web, SMS (*Short Message Service*) e transações eletrônicas, podendo ser classificados em quatro tipos: informação, comunicação, transação e entretenimento, sendo esta classificação aplicada a quase todos os provedores.

Técnicas de MEE e análise de regressão múltipla foram utilizadas no modelo desenvolvido, para analisar os dados recolhidos de alunos de quinze grandes universidades em Taiwan.

As principais conclusões da pesquisa, foram as seguintes: a qualidade do serviço influencia positivamente, tanto o valor e quanto a satisfação percebida do cliente; o valor percebido influencia positivamente tanto a satisfação do cliente, quanto a intenção de pós-compra; a satisfação do cliente influencia positivamente a intenção de pós-compra; a qualidade do serviço tem uma influência positiva indireta sobre a intenção de pós-compra, através da satisfação do cliente ou do valor percebido.

Por fim, o modelo proposto explicou com eficácia as relações entre a qualidade do serviço, o valor percebido, a satisfação do cliente e a intenção de pós-compra, em serviços móveis de valor adicionado, em Taiwan.

5.5 Modelo Deng, Lu, Wei e Zhang (2010)

Embora estudos anteriores sobre adoção e a utilização de serviços de comunicações móveis na China, sejam bastante abrangentes, poucos focalizaram na satisfação e na lealdade dos clientes para estes serviços. Neste estudo, o objetivo do modelo desenvolvido

pelos autores foi o de examinar os determinantes da satisfação e lealdade dos clientes com Serviços Instantâneos de Mensagens.

O Trabalho formulou e validou, na oportunidade, o modelo mais completo de avaliação de satisfação e lealdade do cliente, no contexto internet móvel da China. O estudo possibilitou uma visão sobre as relações nomológicas, entre o valor percebido, a qualidade percebida dos serviços, a confiança, a satisfação do cliente, a custo de mudança e a lealdade do cliente. Foram também examinados, os efeitos de moderação do gênero, idade e tempo de uso, sobre a relação entre cada construto considerado, proporcionando informações úteis de gestão, para o desenvolvimento de melhores estratégias de segmentação de mercado com o objetivo de elevar a satisfação do cliente e fortalecer sua lealdade nos serviços de internet móvel.

Os resultados confirmaram que a confiança, a qualidade percebida do serviço e o valor percebido do cliente, incluindo neste, o valor funcional e valor emocional, contribuem para a geração de satisfação do cliente com serviços instantâneos de mensagens. Os resultados também mostram que a confiança, a satisfação do cliente e o custo de mudança influenciam diretamente a lealdade do cliente. Além disso, este estudo conclui ainda, que a idade, o gênero e o tempo de uso, têm efeitos de moderação sobre a satisfação.

Os autores destacam algumas limitações neste estudo; uma delas está relacionada com a falta de uma relação direta, no modelo proposto, entre a percepção da qualidade do serviço e a lealdade do cliente, considerando que a qualidade de serviço percebida está relacionada com a satisfação, como usualmente constatado nas pesquisas correlatas.

5.6 Modelo de Lee e Mills (2010)

O objetivo do estudo foi desenvolver um arcabouço conceitual para analisar e explicar os fatores que influenciam na satisfação dos clientes, com a utilização dos serviços de tecnologia de comunicação móvel e sua intenção de compra. O trabalho dos pesquisadores foi desenvolvido por meio da aplicação de uma adaptação do Modelo de Satisfação do Cliente Americano (ACSM), com o propósito de obter uma compreensão da satisfação dos viajantes com o comércio por meio de transações móveis e prover, também, uma medida de satisfação, como um relevante indicador de desempenho para a área de negócios do turismo. A proposta do modelo foi testada por meio de técnicas de análise fatorial confirmatória e modelagem de equações estruturais.

Os resultados deste estudo sugerem que o grau de percepção e o valor percebido, com o uso da tecnologia móvel, são fatores determinantes que afetam a satisfação dos clientes, que usam tecnologia móvel em suas experiências na condição de viajantes. A satisfação, por sua vez, influencia o grau de intenção de continuar a usar dispositivos móveis durante as suas viagens. O estudo demonstra ainda que a adaptação do ACSM descreveu adequadamente a relação entre as percepções e experiências de satisfação

dos viajantes com o uso dos serviços móveis.

Os resultados desta pesquisa também indicam que o desenvolvimento de percepção positiva e valor percebido dos viajantes, com a tecnologia móvel, são cruciais para a sua satisfação. A satisfação, por sua vez, influencia o grau de intenção de continuar a usar a tecnologia móvel.

5.7 Modelo de Liu, Guo e Lee (2011)

Nesta pesquisa aplicada por Liu, Guo e Lee (2011) a clientes de comunicações móveis em Taiwan, para testar o modelo proposto pelos autores, foi utilizada uma metodologia de pesquisa de opinião com uma amostra obtida pela devolução de 311 questionários válidos. Esta pesquisa explorou como os construtos qualidade e barreiras de mudança, influenciam a lealdade do cliente e investigou também, os antecedentes da satisfação e da confiança da marca. A técnica de MEE foi utilizada para testar hipóteses que foram propostas para o modelo, que estabelece a construção de um relacionamento de qualidade e o estabelecimento de barreiras de mudança, para reduzir a possibilidade de abandono do cliente e aumentar sua lealdade.

A base para medir os vários construtos do modelo foram itens de medição validados em pesquisas anteriores. A medida de qualidade de serviço foi composta de quatro itens, utilizados de Brady e Cronin (2001), além de Hsieh e Hiang (2004). Uma escala de três, itens adaptados de Moon e Kim (2001), foi usada como medida de dos serviços de entretenimento. As medidas para a relações com o cliente consistiram de três itens, que foram adaptados a partir de Kim et al., (2004). A satisfação foi medida por uma escala de três itens, extraídos de Hsieh e Hiang (2004). A confiança foi medida por uma escala de três itens, também adaptados dos mesmos pesquisadores. Foi verificado que a melhoria da qualidade do serviço, traz os benefícios tanto para o aumento da satisfação do cliente, como também para confiança na marca.

Os resultados indicaram que, tanto a qualidade, como as barreiras de mudança, são fatores importantes, quando as empresas estão tentando manter os clientes e que estas devem focar também na aplicação de métodos que melhorem a satisfação do cliente, conquistem sua confiança e tornem a mudança menos atrativa. Por outro lado, foi constatado que a satisfação, tem um efeito mais forte do que as barreiras de mudança, nas empresas de comunicações móveis, tornando-se mais difícil estabelecer barreiras de mudança, em função da concorrência acirrada e das políticas adotadas pelas agências reguladoras.

Uma limitação reconhecida pelos pesquisadores é de natureza metodológica, e remete à inclusão de medidas de correlação elevada entre os construtos, embora estes tenham evidenciado um adequado desempenho para a validade discriminante.

5.8 Modelo de Díaz, Martín-Consuegra e Esteban (2011)

Um modelo para analisar o efeito de satisfação e a comunicação boca-a-boca, sobre a lealdade do cliente, bem como para explorar a ligação entre estas variáveis, na área de serviços de comunicações móveis, foi proposto por Díaz, Martín-Consuegra e Esteban (2011). Para testar as hipóteses propostas nesta pesquisa, um modelo de relações causais foi aplicado a uma amostra constituída de 257 clientes do serviço de comunicações móveis, com o perfil de jovens, com idade entre 18 e 30 anos. Para avaliar o papel da satisfação do consumidor na escolha da marca de telefones celulares, o modelo utilizou as variáveis, lealdade e a comunicação boca-a-boca positiva e determinou a natureza do relacionamento, entre a lealdade e a prática desta comunicação pelos entrevistados.

A pesquisa foi planejada levando em consideração escalas de medição utilizadas em estudos anteriores, embora o seu conteúdo tenha sido adaptado para o contexto específico desta investigação. A escala utilizada para medição da satisfação é uma modificação adaptada de Ganesan (1994), medida por uma escala Likert de 7 pontos. Para a medição da lealdade, os clientes expressaram sua relação com o uso do aparelho celular por meio de duas dimensões perspectivas de lealdade: a comportamental e a atitudinal.

Esta variável foi medida usando uma escala de Likert de 7 pontos, com cinco itens baseados nos trabalhos de diversos pesquisadores (FORNELL *et al.*, 1996; DICK e BASU, 1994; FORNELL 1992). Por fim, a comunicação boca-a-boca do cliente foi determinada com um escala Likert de 7 pontos. Os trabalhos realizados anteriormente, por Fornell *et al.*, (1996), Dick e Basu (1994) e Fornell (1992) foram utilizados para formular a escala. Os resultados obtidos na avaliação das hipóteses confirmaram a existência de uma relação significativa e positiva, entre a satisfação, a lealdade e a comunicação boca-a-boca para os usuários de serviços de comunicações móveis, permitindo aos pesquisadores confirmar as três hipóteses propostas. A satisfação tem um forte impacto, direto e positivo, sobre a lealdade e esta, por sua vez, teve um impacto positivo e direto impacto positivo na comunicação boca-a-boca e a comunicação boca-a-boca positiva.

Os autores reconhecem algumas limitações metodológicas e conceituais quanto aos resultados obtidos nesta pesquisa, entre elas, destaca-se o fato de que as características da amostra da população limitaram um pouco as conclusões.

5.9 Modelo de Uddin e Akhter-2012

O estudo realizado por Uddin e Akhter (2012), explorou a avaliação da satisfação do cliente e seus fatores de influência, no setor de comunicações móveis em Bangladesh, um dos países da Ásia, com um dos crescimentos mais expressivos nos serviços de telecomunicações. Para analisar os dados, foram utilizadas as técnicas de análise de componentes principais e modelagem de equações estruturais, incluindo o modelo de mensuração e o modelo estrutural.

A pesquisa foi estruturada por meio de quatro construtos, nomeadamente, a qualidade de serviço, o preço, o valor percebido e a satisfação do cliente, envolvendo dezenove variáveis de medida associadas. Os resultados empíricos obtidos pelos pesquisadores mostraram que tanto a qualidade do serviço, como a percepção do preço justo, influenciam positivamente os clientes dos serviços oferecidos pelas operadoras de comunicações móveis, por meio do valor percebido. Assim como valor percebido, também influenciou positivamente satisfação do cliente. De modo semelhante a outros estudos realizados por Kuo et al., (2009); Lai *et al.* (2009) além de Turel e Serenko, (2006), o valor percebido realiza um papel mediador entre a qualidade do serviço, o preço justo e o atendimento à satisfação do cliente.

Uma das limitações da pesquisa é decorrente da natureza exploratória do estudo, que considerou a inclusão de apenas três fatores como os mais relevantes na influência sobre a satisfação de cliente.

5.10 Modelo de Vranakis, Chazoglou e Mpaloukas (2012)

O objetivo desta pesquisa contempla a criação de um modelo para medir a satisfação dos clientes com empresas prestadoras de serviços de comunicações móveis da Grécia e a compreensão da importância da satisfação do cliente e seus efeitos sobre a eficiência econômica das empresas. Os resultados indicam que a imagem da empresa é o principal fator que afeta, não só a satisfação do cliente, mas também o valor percebido, a qualidade de serviço e a lealdade dos clientes.

A construção do modelo inclui a avaliação de muitos fatores que afetam a satisfação do consumidor e levam ao aumento da lealdade do cliente incorporando muitas das conclusões de pesquisas de outros pesquisadores, que estudam temas semelhantes, em outros campos de pesquisa e em outros países. Verificou-se que a satisfação do cliente afeta, em grande medida, a lealdade do cliente para com a empresa. Finalmente, a conclusão mais importante é que a imagem da empresa é o fator, que mais do que qualquer outro presente no modelo, afeta a satisfação do cliente e também em grande medida a sua lealdade. Podem ser consideradas limitações da pesquisa, o tamanho da amostra de 300 participantes, ensejando assim, uma avaliação sobre a ampliação da amostra, com vistas a obtenção de melhores resultados e a inclusão de alguns outros fatores, que devido a subjetividade de algumas questões utilizadas, poderiam melhorar o desempenho do modelo.

6 | CONCLUSÕES

A partir da privatização das telecomunicações brasileiras **novas concessões**, regulamentos e as privatizações dinamizaram o mercado e afetaram sensivelmente a o

nível da competição, despontando uma necessidade de avaliação dos clientes quanto à oferta de serviços das operadoras móveis, de modo a refletir as opiniões de satisfação destes com os serviços oferecidos.

Neste trabalho foi apresentada a fundamentação teórica relativa à pesquisa desenvolvida sobre modelos de satisfação do cliente de serviços na área comunicações móveis, sendo construída com base em uma ampla revisão bibliográfica. Foram examinados os objetivos e o escopo de trabalhos que os utilizam os modelos, sendo destacadas, também, as definições da satisfação e suas metodologias de medição, com foco especial nos os fundamentos teóricos do modelo de desconformação de expectativas.

Foi oferecida ainda, uma análise das diferentes contribuições conceituais e pesquisas correlatas, abrangendo os relacionamentos da satisfação do cliente. Foram analisados dez modelos de avaliação da satisfação do cliente utilizados em vários países, com aplicação de MEE, de modo a oferecer a gestores a compreensão dos parâmetros de satisfação na oferta dos serviços das organizações. As análises dos modelos de satisfação demonstram que medir a satisfação com objetividade e critério, tem importância vital no processo de tomada de decisões estratégicas das empresas, contribuindo para uma linha de investigação de grande importância acadêmica e mercadológica.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Z., AHMED I., NAWAZ, M. M., USMAN, A., SHAUKAT, M. Z., & AHMAD, N. **Impact of service quality of Short Messaging Service on customer's retention: An empirical study of cellular companies of Pakistan**. International Journal of Business and Management. v.5(6), p.154-160, 2010.
- ALOM, K., KHAN, A., & UDDIN, M.A.N.M. **Selection of cellular operators in Bangladesh: An empirical analysis**. International Journal of Mobile Marketing. 5(2), p.114-125, 2010.
- ANDERSON, R.E. **Consumer dissatisfaction: the effect of disconfirmed expectancy on perceived product performance**, Journal of Marketing Research, v.10, p.38-44, 1973.
- ANDERSON, E.W., & FORNELL, C. **The impact of performance on customer satisfaction and retention: An investigation of industry differences**, National Quality Research Center Working Paper. University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1991.
- ANDERSON, E.W., & FORNELL, C. **Foundations of the American Customer Satisfaction Index**, Total Quality Management & Business Excellence. v.11:7, p.869-882, 2000.
- BARANIUK, J. **Modelo de Gerenciamento de Serviços, Utilizando o Valor do Cliente no Tempo: Uso de Mineração de Dados em um Serviço de Telecomunicações**. Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba, PR, 2009.
- BRADY, M. K., ROBERTSON, C. J., & CRONIN, J. J. **Managing behavioral intentions in diverse cultural environments: An investigation of service quality, service value, and satisfaction for American and Ecuadorian fast-food customers**. Journal of International Management. v.7(2), p.129-149, 2001.
- BUGEL, M., BUUNK, A., & VERHOEF, P. **A comparison of customer commitment in five sectors using the psychological investment model**. Journal of Relationship Marketing. v.9, p.2-29, 2010.

CHURCHILL, Jr. G.A., & SURPRENANT, C. **An investigation into the determinants of customer satisfaction.** Journal of Marketing Research. v.19, p.491–504, 1982.

CRONIN, J.J., & BRADY, M. K., **Some New Thoughts on Conceptualizing Perceived Service Quality: A Hierarchical Approach.** The Journal of Marketing, Vol. 65, No. 3 2001), pp. 34-49,2001

DENG, Z., LU, Y., WEI, K.K., & ZHANG, J. **Understanding customer satisfaction and loyalty: An empirical study of mobile instant messages in China,** International Journal of Information Management. v.30, p.289-300, 2010.

DÍAZ, E., CONSUEGRA, D. M., & ESTEBAN, A. **Consumer loyalty in mobile telephony.** African Journal of Business Management, v.5(33), p.12715-12727, 2011.

DICK, A., & BASU, K. **Customer loyalty: towards an integrated framework.** J. Acad. Mark. Sci., v.22(2): p.99-113, 1994.

DUTKA, A. **AMA Handbbok of customer satisfaction: A guide to research, planning, and implementation,** NTC Publishing Group, Illinois, 1995.

ENGEL, J. F., & BLACKWELL, R. D. **Consumer behavior,** Holt, Rinehart and Winston, New York, 1982.

ESHGHI, A., KUMAR, S., & GANGUI, H. **Service quality and customer satisfaction: An empirical investigation in Indian mobile telecommunications services.** Marketing Management Journal, fall, p.119-144, 2008.

FAZLZADEH, A., KHOSHMARAM, A., & FEYZIPOUR, A. **How quality, value, image, and satisfaction create loyalty at an Iran telecom.** International Journal of Business and Management, v.6(8), p.271-279, 2011.

FORNELL, C. **A National Customer Satisfaction Barometer: The Swedish experience.** Journal of Marketing. v.56 (1), p.6-21, 1992.

FORNELL, C., JOHNSON, M. D., ANDERSON, E. W., CHA, J., & BRYANT, B.E. **The American customer satisfaction index: nature, purpose, and findings.** Journal of Marketing. v. 60, n°.10, p.7-18, 1996.

GANESAN S. **Determinats of long-term orientation in buyer-seller relationship,** Journal of Marketing , vol.58 n.2 April, pp.1-19, 1994.

GERPOTT, T.J., RAMS, W., & SCHINDLER, A. **Customer retention, loyalty, and satisfaction in the German mobile cellular telecommunications market,** Telecommunications Policy. v.(25:4), p.249-269, 2001.

GERSON, R.F. **Measuring customer satisfaction: A guide to managing quality service,** Crisp Publications, Menlo Park, 1993.

GRIGOROUDIS, E., & SISKOS, Y. **Customer Satisfaction Evaluation – Methods for Measuring and implementing Service Quality.** 1º ed. Spring, New York. 2010.

GRIGOROUDIS, E., & SISKOS, Y. **Preference disaggregation for measuring and analysing customer satisfaction: The MUSA method.** European Journal of Operational Research. v.143 (1), p.148–170, 2002a.

GRIGOROUDIS, E., & SISKOS, Y. **Customer Satisfaction Evaluation: Methods for Measuring and Implementing Service Quality with Integrated Software,** Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (in preparation), 2002b.

HOWARD, J.A., & SHETH, J. **The theory of buyer behavior**, John Wiley and Sons, New York, 1969.

HSIEH, Y.-C., & HIANG, S.-T. **A study of the impacts of service quality on relationship quality in search-experience-credence services**. Total Quality Management. v.15(1), p.43–58, 2004

HUNT, H. K. **CSD overview and future research directions**. In H. Keith Hunt (Ed.), **Conceptualization and Measurement of Consumer Satisfaction and Dissatisfaction**. Marketing Science Institute, MA. p.455-488, 1977.

JOHNSON, M.D., & FORNELL, C. **A framework for comparing customer satisfaction across individuals and product categories**. Journal of Economic Psychology, v.12, p.267-286, 1991.

KANO, N., SERAKU, N., TAKAHASHI, F., & TSUJI, S. **Attractive Quality and Must-be Quality**, Hinshitsu. The Journal of the Japanese Society for Quality Control, 1984, pp. 39 -48.

KEAVENEY, S. M. **Customer switching behavior in service industries: An exploratory study**. Journal of Marketing. v.50, n° 2, p.71-82, 1995.

KIM, M. K., PARK, M. C., & JEONG, D. H. **The effects of customer satisfaction and switching barrier on customer loyalty in Korean mobile telecommunication services**. Telecommun Policy. v.28(2), p.145–159, 2004.

KUO, Y.F., WU, C.M., & DENG, W.J. **The relationships among service quality, perceived value, customer satisfaction, and post-purchase intention in mobile value-added services**, Computers in Human Behavior, v.25, p.887-896, 2009.

LEE, J. K., & MILS, J. E. **Exploring Tourist Satisfaction with Mobile Experience Technology**. International Management Review. v.6(1), p.10-23, 2010.

LEELAKULTHANIT, O., & HONGCHARU, B. **Factors that impact customers satisfaction: Evidence from the Thailand mobile cellular network industry**. International Journal of Management and Marketing Research. v.4(2), p.67-76, 2011.

LIU, C.T., GUO, Y.M., & LEE, C.H. **The effects of relationship quality and switching barriers on customer loyalty**. International Journal of Information Management. v.31 p.71–79, 2011.

MASSNICK, F. **The customer is CEO: How to measure what your customers want and make sure they get it**, Amacom, New York, 1997.

MOTOROLA. **Customer Satisfaction Assessment Guide**, Motorola University Press. 1995.

MOON, J.W., & KIM, Y.G. **Extending the TAM for a world-wide-web context**. Information & Management. v.38(4), p.217–230, 2001.

NESLIN, S., GUPTA, S., KAMAKURA, W. L. J., & MASON, C. **Defection detection: measuring and understanding the predictive accuracy of customer churn models**. Marketing Research, Journal of 204–211, v.43(2), 2006.

OLIVER, R.L. **Theoretical bases of consumer satisfaction research: review, critique, and future directions**. Theoretical developments in marketing. Chicago, IL: American Marketing Association. New York: McGraw-Hill, p. 206-210, 1997.

OMOTAYO, O., & JOACHIM, A. A. **Customer service in the retention of mobile phone Users in Nigeria**, Afr. J. Bus. Manage., v.2(2): p.26-31, 2008.

PARKER, C., & MATHEWS, B.P. **Customer satisfaction: contrasting academic and consumers'**

interpretations, Marketing Intelligence and Planning. v.19/1, p.38-44, 2001.

RAHMAN, S., HAQUE, A., & AHMAD, M. **Choice criteria for mobile telecom operator: Empirical investigation among Malaysian customers**. International Management Review. v.7(1), p.50-57, 2011.

SADIA, J., TASNEEM, F., & KHAN, M. **An empirical analysis of customer loyalty in Pakistan's telecommunication industry**. Database Marketing & Customer Strategy Management, v.18(1), p.5-15.,2011.

SILVA, G. S. **Contribuições ao estudo de modelagem de equações estruturais na avaliação da satisfação do cliente de serviços de comunicações móveis**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN, 2015.

TSE, D., & WILTON, P. **Models of Consumer Satisfaction Formation: an Extension**, Journal of Marketing Research, v. 15, p. 204-212, 1988.

TUREL, O., & SERENKO, A. **Satisfaction with mobile services in Canada: an empirical investigation**, Telecommunications Policy, p.314–331, 2006.

UDDIN, M.B., AKHTER, B. **Customer satisfaction in mobile phone services in Bangladesh: a survey research**. Management Marketing, 2012.

VRANAKIS, S., CHATZOGLOU, P., & MPALOUKAS, A. **Customer Satisfaction of Greek Mobile Phone Services**. International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC). v. 3, n°. 4, 2012.

WESTBROOK, R.A., & REILLY, M.D. **Value-percept disparity: An alternative to the disconfirmation of expectations theory of customer satisfaction**, in: R.P. BAGOZZI AND A.M. TYBOUT (eds.), Advances in consumer research, Association for Consumer Research, Ann Arbor, MI, p.256-261, 1983.

WOODRUFF, R. B., & GARDIAL, S.F. **Know Your Customer: New Approaches to Understanding Customer Value and Satisfaction**. Blackwell Publishers, Oxford, 1996.

YI, Y. **A critical review of consumer satisfaction**. In: Zeithaml, V.A. (Ed.), **Review of Marketing 1989**. American Marketing Association, Chicago, IL, 1991.

ZEITHAML, V., BITNER, M. & GREMLER, D. **Service marketing: integrating customer focus across the firm**, 4 th ed., Mc –Graw -Hill, Singapore, 2004.

ATAQUES E DESCOBERTA DE VULNERABILIDADES EM REDES CORPORATIVAS

Data de aceite: 01/06/2020

Data da submissão: 10/03/2020

Roger Robson dos Santos

Programa de Pós-Graduação em Informática
(PPGIa)

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-
PR)

Curitiba - PR – Brasil

<http://lattes.cnpq.br/3797351864330209>

Jackson Mallmann

Instituto Federal Catarinense – Jardim Maluche
Brusque - SC

<http://lattes.cnpq.br/4046837503511326>

RESUMO: O avanço da tecnologia é um dos problemas para o surgimento de vulnerabilidades em redes de computadores corporativas. Este crescimento não é acompanhado pelas empresas que não investem e nem se preocupam com a segurança. O nosso estudo foca em conhecer o processo de uma atividade pentesting do tipo gray box em uma rede de computadores corporativa simulada, com serviços e vulnerabilidades dos dias atuais. Assim mostramos as empresas um incentivo para que possam investir em segurança e para que profissionais da área se interessem

em buscar conhecimentos de segurança ao desenvolverem seus sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: CyberSegurança, pentest, redes corporativas, ataques de rede, segurança da informação

ABSTRACT: The advancement of technology is one of the problems for the emergence of vulnerabilities in corporate computer networks. This growth is not accompanied by companies that do not invest or worry about security. Our study focuses on knowing the process of a gray box pentesting activity on a simulated corporate computer network, with services and vulnerabilities of the present day. Thus, we show companies an incentive so that they can invest in security and for professionals in the area to be interested in seeking security knowledge when developing their systems.

KEYWORDS: CyberSecurity, pentest, corporate networks, network attacks, information security

1 | INTRODUÇÃO

A informática, ferramenta muito utilizada para auxiliar trabalhos diários das empresas, capaz de prover uma conectividade e comunicação entre pessoas da própria empresa e de fora. Seu grande crescimento

na usabilidade e aplicabilidade das redes de computadores, tem se tornado cada dia mais frequentes vulnerabilidades de segurança em equipamentos de informática, sendo que muitos fabricantes desconhecem e dificilmente resolvem estes problemas. Com esse crescimento, torna-se indispensável a utilização de mecanismos de segurança conhecidos como, *Antivírus*, *Firewall*, Políticas de Segurança, Análise de Riscos e Vulnerabilidades, Backup, *Firewall* de Aplicação Web (WAF), Detecção de Intrusão (IDS), Sistema de Prevenção de Intrusão (IPS), sendo essas grandes aplicações de segurança na área de redes e servidores.

Com o passar dos anos diversas técnicas na segurança de sistemas foram descobertas, e com isso tem tido um aumento nas pesquisas que envolvem identificação de anomalias na rede, muitas destas pesquisas visam melhorar técnicas de segurança utilizadas pelas empresas.

Neste trabalho temos como foco em conhecer uma visão geral na segurança da informação encontrando soluções que possibilitem um sistema mais confiável e seguro para seus usuários, além como atacantes descobrem e se aproveitam destas vulnerabilidades.

Nosso objetivo neste trabalho, será apresentar diversos métodos e técnicas utilizadas por um *pentester*, em um teste de *Gray Box*, a fim, de identificar vulnerabilidades em redes corporativas conhecendo breves informações limitadas sobre a rede e os serviços existentes.

Junto ao auxílio do sistema operacional *Kali Linux*, vamos simular a realização de testes de intrusão utilizando de ferramentas como *NMAP*, *WPScan*, *Burp Suite*, *Hydra*, *Dig*, *Metasploit* e muito mais em um ambiente que emula uma rede corporativa real, para melhor entendimento foi criado na Figura 2 todos os passos necessários para realização dos testes.

A motivação para realização deste trabalho, está em demonstrar como um atacante identifica vulnerabilidades em uma rede corporativa e quais medidas são necessárias para se prevenir, tornando seu ambiente mais seguro e confiável.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para facilitar o entendimento referente aos estudos de caso que foram realizados, será descrito uma breve história da internet com alguns aspectos necessários para melhor compreensão, abordando também as ferramentas, técnicas e algoritmos utilizados no trabalho. Além disso será também efetuado uma análise empírica entre eles, tendo como intuito selecionar as melhores técnicas de segurança da informação.

2.1 Introdução a História da Internet

A internet, uma ferramenta que se tornou dependência na vida das pessoas, seja

para lazer, trabalho, a internet nunca foi algo planejado, ela surgiu durante a Guerra Fria nos Estados Unidos cobrindo a necessidade de comunicação entre bases americanas em 1945. Quando se iniciou, ela se chamava ARPANET, nome derivado da empresa que a desenvolveu (*Advanced Research and Projects Agency*), desta forma garantir a comunicação entre os soldados americanos, caso o pentágono fosse atingido pela Ex-União Soviética (Atualmente Rússia) [Staling 2006].

Logo adiante, membros da MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) tiveram uma ideia, converter toda a linguagem da ARPANET para uma linguagem mais humana, com isso desencadeou os primeiros mestres da informática, conhecidos como *Hackers*, que foram capazes de criar e desenvolver os primeiros compiladores da época até chegar os atuais compiladores [Staling 2006].

Com o passar dos anos começaram a nascer problemas de invasões em redes de internet nas organizações, com isso em 1994 a IAB (*Internet Architecture Board*) iniciou a emissão de relatórios de arquitetura de internet. Mostrando que havia a necessidade de melhorar a segurança da internet [Staling 2006].

2.2 Incidentes Relatados no Brasil

O CERT.br (Centro de Estudos, Resposta e Tratamentos de Incidentes de Segurança no Brasil) um Grupo de Resposta a Incidentes de Segurança para internet no Brasil mantido pela NIC.br, do Comitê Gestor da internet no Brasil. Tem como objetivo atuar no tratamento de incidentes e na conscientização sobre os problemas de segurança. Na figura 1 apresenta-se um gráfico dos incidentes reportados pela CERT.br [cert.br 2020].

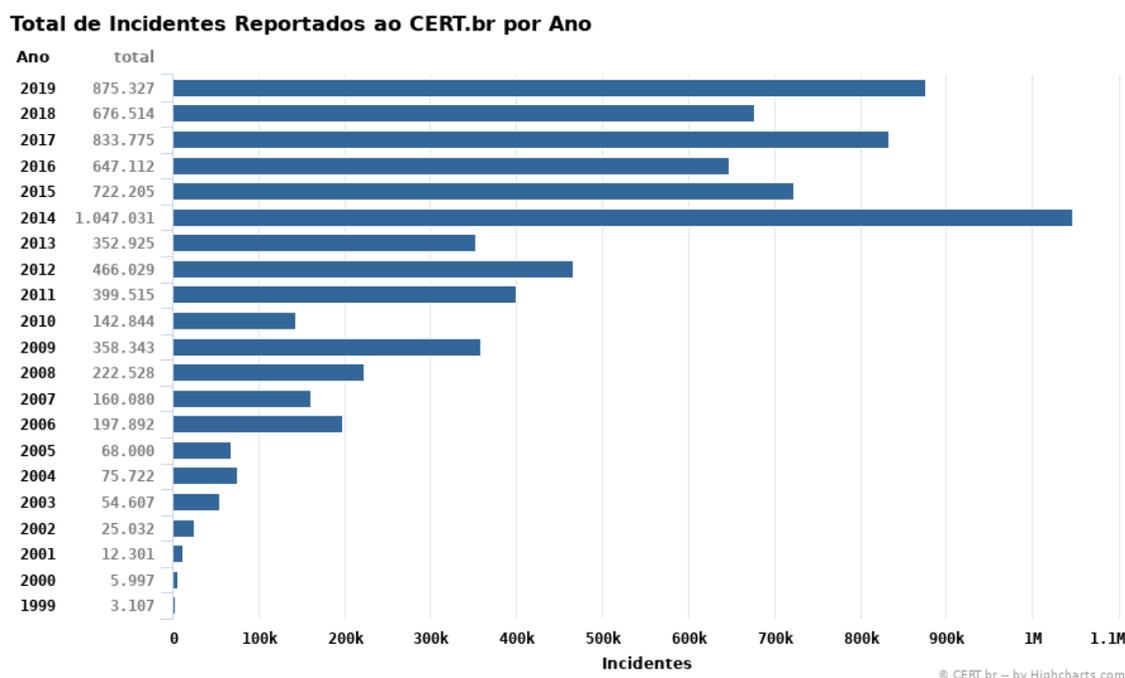


Figura 1. Total de Incidentes Reportados ao CERT.br por Ano [cert.br 2020].

2.3 São Pilares da Segurança da Informação

São pilares da segurança da informação.

- **Confidencialidade:** Garantir que as informações trocadas dentro do sistema de informação sejam confidenciais. (Roubo de banco de dados é uma violação) [Landwehr et al. 2011].
- **Disponibilidade:** Visa garantir que seu sistema esteja sempre disponível a quem interessa. Exemplos de ataques DDOS, faxineira na tomada [Yahya et al. 2015].
- **Integridade:** Garantir que todos os dados trafegados estejam íntegros e originais aos que foram enviados. Exemplo um banco enviando dinheiro para outro banco (um atacante do meio poderia alterar as informações) [Yahya et al. 2015].
- **Autenticidade:** Visa garantir que tal informação foi autêntica por tal usuário. Exemplo, você assina digitalmente um e-mail ou documento e vai pertencer a você. Você assina e garante que é sua [Landwehr et al. 2001].
- **Irretratabilidade (Não-repúdio):** Você não pode negar um ato que você fez. Fizer algo e alguém for investigar não terá como negar que você fez aquela coisa. Exemplo: Chaves autenticação, chaves criptografia, logs. (Enviar um e-mail no nome de outra pessoa de forma que você não vai ser descoberto) [Yahya et al. 2015].

2.4 Invasores e Profissionais da Segurança da Informação

Hackers são pessoas que constroem ferramentas que auxiliam e facilitam o trabalho dos usuários, normalmente os *hackers* costumam ter uma ideia de que o acesso à rede da internet deve ser ilimitado com o objetivo do autoconhecimento, em meio a isso *hackers* cometem crimes de invasões, com o intuito de corrigir problemas que os técnicos de informática das organizações desconhecem, ajudando os mesmos, a evitar ataques por meio de *crackers*, podemos dizer que o *hacker* é o profissional que mais contribui para que os pilares da segurança da informação não sejam quebrados, mas sim, renovados a cada dia [Marques 2010] .

Crackers, estes são opostos dos *hackers*, eles têm apenas o entendimento utilizado para o mal, utilizam suas habilidades técnicas e ferramentas com intuito de destruir uma rede, piratear programas, jogos e construção de vírus capazes de destruir todas as informações de uma rede, podemos dizer que o *crackers* são os principais responsáveis por encontrar vulnerabilidades, afim de tentar quebrar os pilares da segurança da informação [2010].

Quando falamos de serviços de segurança, podemos dar como exemplo o serviço de autenticação de dados, onde os dados durante a comunicação são assegurados que a entidade ao qual estamos se comunicando, realmente é aquela que se afirma ser. Outro grande serviço importante é o controle de acesso. Ele impede que o uso não autorizado de algum recurso dentro da organização trabalhe com a instrução de Confidencialidade, ou seja, ela assegura que não haja divulgação dos dados não autorizados garantindo a

proteção de dados durante a conexão e mesmo em uma conexão de um arquivo local [Stalling 2006].

2.5 Tipos de Pentest (Testes de intrusão)

Iremos abordar técnicas capazes de identificar vulnerabilidades de rede através de testes de intrusão, para melhor entendimento dessas técnicas precisamos entender quais os tipos de *pentesting* podem ser utilizados.

- **Black Box (Caixa Preta):** O *pentester* não tem ideia do que ele vai encontrar durante o teste, ele irá buscar coletar informações sobre o sistema ou a rede alvo. O principal motivo deste teste é que o *pentester* só sabe os resultados que ele pode esperar, mas não sabe como irá chegar até eles, lembrando que neste teste não serão examinados nenhum código fonte apenas a intrusão propriamente dita na rede [Jimenez 2016].
- **White Box (Caixa Branca):** Neste teste, o *pentester* já tem ideia sobre o sistema que ele irá testar, pois lhe será fornecido uma gama de informações sobre o sistema e a rede (detalhes de SO, endereços de IP, códigos fontes, aplicações etc.). Desta vez o *pentester* irá simular um ataque por uma fonte interna. O teste consiste em examinar códigos fontes e fluxos de dados, caminhos, loops e entres outros na rede da empresa [Gutmann et al. 2010].
- **Gray Box (Caixa Cinza):** O *pentester*, desta vez possui algumas informações parciais ou limitadas sobre detalhes da rede e aplicações de sistema. Pode desta vez efetuar um ataque externo afim de obter acesso ilegítimo a diversos documentos da infraestrutura da rede da organização [Rahimpour et al. 2017].

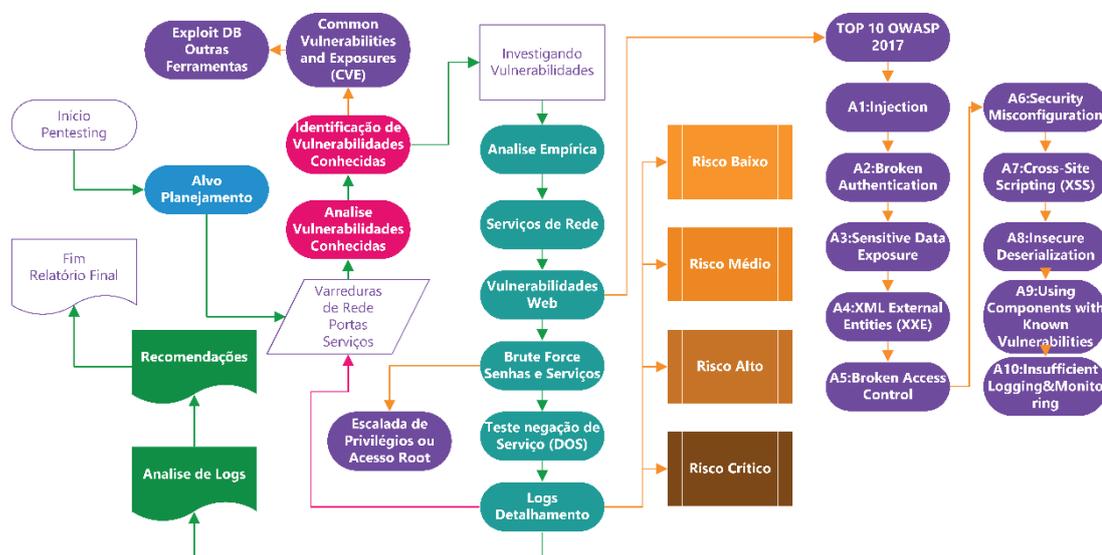


Figura 2. Etapas de Pentesting

3 | MÉTODO PROPOSTO

Em nossa proposta será realizado a procura por *tokens* em um sistema que simula uma rede computadores corporativa, ao qual teremos que utilizar diversos métodos e técnicas para buscar e encontrar esses *tokens*, visto que, eles estão escondidos em

serviços de redes encontrados no ambiente alvo.

3.1 Ambiente Teste

A realização dos nossos testes ocorreu no ambiente teste “*Pentestit – Penetration Testing Laboratories*” utilizando “*Test Lab V.12*”, que apresenta 16 *tokens* para procurar, sendo eles *Mail, DNS, Helpdesk, Users, Repository, SIEM, Site, My, API, User API, Image, VPN, DB, AD, Admin e Reverse*.

A *Pentesti*, é um laboratório que emula a infraestrutura de uma rede corporativa real com o objetivo de aprimorar as habilidades em um processo de *pentesting*. Os laboratórios possuem as vulnerabilidades recentes mais conhecidas cobrindo as áreas de segurança de rede, segurança de sistemas operacionais e aplicativo. O ambiente é construído para realização de testes em *Gray Box*, onde os participantes têm a informação sobre a infraestrutura de rede em forma de esquema e uma descrição de texto.

4 | ETAPAS DE PENTEST GRAY BOX

Com ajuda do fluxograma apresentado na Figura 2, relatamos que os testes de *Gray Box* serão conduzidos a partir da identificação do alvo (Empresa em questão) junto a um planejamento, com isso uma sondagem e varredura de portas será usado para identificação de serviços executando nesta rede alvo, em nosso caso, o nosso ambiente teste *Test Lab V.12*.

Com a descoberta de portas de serviços, vamos explorar as vulnerabilidades conhecidas, que podem ser encontradas no *site* do *Common Vulnerabilities and Exposures (CVE)* [CVE 2020], um *site* que apresenta as principais vulnerabilidades. Após a descoberta dos serviços conhecidos, a partir de agora será necessário analisarmos mais a fundo os serviços restantes e investigarmos possíveis vulnerabilidades. Caso seja encontrado uma vulnerabilidade que possibilite acesso ao sistema, será necessário agora repetir os processos a partir do processo de varreduras de portas. A OWASP [OWASP 2020], uma comunidade *online* que cria e disponibiliza de forma gratuita metodologias, artigos, ferramentas, documentação e tecnologias de segurança para aplicações web, pode nos apresentar os TOP 10 de vulnerabilidades web conhecidas, tornando uma ótima ferramenta a investigação de vulnerabilidades encontradas durante nossos testes.

Com o processo anterior realizado, agora é hora de colocar um grau de risco para cada vulnerabilidade como por exemplo: risco baixo (Serviços desatualizados, sistema operacional sem reiniciar etc.), médio (Listagem de diretórios, Falta de proteção conta *brute-forcing*, página de administração aberta etc.), alto (Criptografia de senhas em MD5, Página de login sem Criptografia SSL, *Cross-site Scripting (XSS)* etc.) ou crítica (*SQL Injection, Shell Upload*). Com os riscos identificados, será necessária uma avaliação dos logs em busca de outros possíveis problemas e assim avaliar as recomendações de

mudança para o sistema.

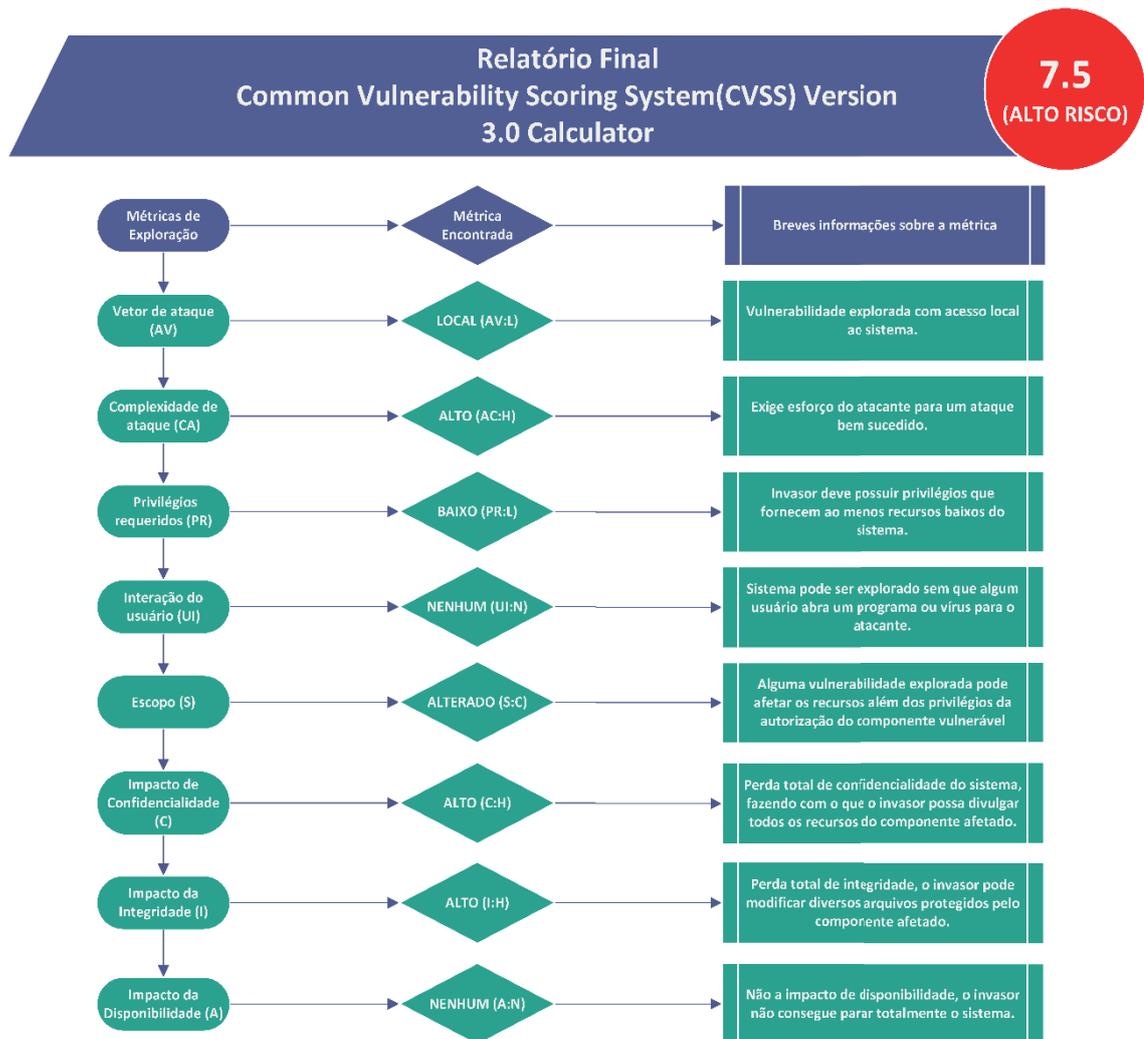


Figura 3. Relatório final CVSS

Por fim elaborar o relatório final com intuito de identificar e catalogar todas as vulnerabilidades envolvidas no sistema, irregularidades, possíveis abordagens de melhorias e resoluções de problema, para isso utilizaremos o *Common Vulnerability Scoring System (CVSS)*, um relatório que produz uma pontuação numérica que reflita a gravidade das vulnerabilidades encontradas. Esta pontuação consiste em representar as vulnerabilidades como (baixa, média, alta e crítica), podendo assim ajudar as organizações de como avaliar e priorizar adequadamente o processo de gerenciamento de suas vulnerabilidades. Na Figura 3 apresenta-se o relatório que foi construído durante o projeto.

Conforme a Figura 3, podemos observar as métricas adotadas pelo CVSS, onde podemos identificar as métricas de exploração e baseado na resposta geramos um *Score* da rede em questão, em nosso trabalho, nosso laboratório teste apresentou uma nota de 7.5 de risco, considerada Alto Risco segundo o CVSS.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização de uma análise de intrusão em uma rede corporativa em testes de *pentest*, podemos identificar uma metodologia eficaz no processo de *pentest* do tipo *Gray Box* utilizando nosso processo no fluxograma apresentado na Figura 2. Destacamos ainda a utilização de uma ferramenta gratuita, o *Kali Linux*, composto por diversas ferramentas capazes de auxiliar em nosso projeto, a fim de obter informações sobre vulnerabilidades.

Podemos destacar que nenhuma aplicação está perfeitamente segura e livre de ataques, mas com o uso de técnicas ou testes de intrusão (*Pentesting*) diversas destas vulnerabilidades podem ser encontradas e superadas, evitando ataques que visam minar a integridade e confiabilidade dos dados que eles manipulam.

É importante trabalhar com um risco reduzido e segurança dentro da organização, garantindo integridade de arquivos, visto que o avanço da tecnologia tem gerado diariamente inúmeras vulnerabilidades de segurança de rede.

O objetivo deste trabalho foi demonstrar um estudo de métodos de intrusão de redes (*Pentesting*) em uma rede de computadores corporativa, convencendo as empresas da necessidade de segurança em suas organizações.

REFERÊNCIAS

Cert.br 2020 “Centro de Estudos, Resposta e Tratamento de Incidentes de Segurança no Brasil”. Available at [<https://www.cert.br>].

CVE 2020 “Common Vulnerabilities and Exposures”. Available at [<https://cve.mitre.org/>].

CVSS 2020 “Common Vulnerability Scoring System SIG”. Available at [<https://www.first.org/cvss/>].

Gutmann, Peter; Naccache, David; Palmer, Charles C. (2010) – “Opportunities in White-Box Cryptography”. IEEE Computer and Reliability Societies.

Jimenez, Rina Elizabeth Lopez de. (2016) “Pentesting on Web Applications using Ethical – Hacking”.

Kali Linux 2020 “Penetration Testing and Ethical Hacking Linux Distribution”. Available at [<https://www.kali.org>].

Landwehr, Carl E. (2001) “Computer security”.

Marques, Glenio Leitão Filho (2010) – “Hackers e Crackers na internet: as duas faces da moeda”.

OWASP 2020 “The Open Web Application Security Project”. Available at [<https://www.owasp.org>].

PENTESTIT 2020 “Penetration Testing Laboratories”. Available at [<https://lab.pentestit.ru>].

Rahimpour, Ebrahim; Rashtchi, Vahid; Aghmasheh, Reza (2017) – “Parameters Estimation of Transformers Gray Box Model”

Stalling, Willian. (2006) “Criptografia e segurança de redes”, vol. 4.

Yahya, Fara; Walters, Robert J.; Wills, Gary B. (2015) "Analysing Threats in Cloud Storage". World Congress on Internet Security (WorldCIS-2015), pp. 44–48.

MODELO MATEMÁTICO PARA CONSOLIDAÇÃO DE MÁQUINAS VIRTUAIS

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 09/03/2020

Alexandre Henrique Teixeira Dias

Universidade Federal de Lavras, Departamento
de Ciência da Computação
Lavras – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7507259814589141>

Luiz Henrique Andrade Correia

Universidade Federal de Lavras, Departamento
de Ciência da Computação
Lavras – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/0453754730316303>

RESUMO: Nos últimos anos, a popularização da Internet acarretou uma demanda crescente por recursos computacionais com alta capacidade e disponibilidade. O alto investimento em recursos computacionais, aliado ao custo de manutenção e operação, fez com que muitas empresas terceirizem os seus centros de dados. A computação em nuvem surge como um modelo que provê aos usuários recursos computacionais sob demanda por meio de pagamento por uso. Grandes empresas como Amazon, Google e Facebook têm investido em computação em nuvem, oferecendo diversos serviços e aplicações aos seus usuários. Esses

grandes centros de dados têm sido responsáveis por cerca de 2% do consumo de energia elétrica global. Técnicas como a virtualização de servidores têm sido empregadas para reduzir custos de operação e consumo de energia. A consolidação de máquinas virtuais tem como objetivo realocar máquinas virtuais para um número reduzido de máquinas físicas usando migração. Mas, o processo de migração pode causar degradação do desempenho da máquina virtual, penalizando provedores de serviços em nuvens, conforme o acordo de nível de serviço estabelecido com o usuário. Na literatura recente, são encontrados diversos trabalhos que utilizam heurísticas para solucionar o problema da consolidação de máquinas virtuais (*virtual machine consolidation problem* - VMCP). Este trabalho utiliza métodos exatos para encontrar uma solução ótima para o VMCP, por meio de programação linear inteira mista. Resultados utilizando o simulador CloudSim Plus, 10 dias de traces do *PlanetLab*, para quatro tipos de máquinas virtuais, e uma configuração de 800 máquinas físicas, mostraram que o modelo exato proposto, encontra solução ótima em até 190 segundos.

PALAVRAS-CHAVE: computação em nuvem, migração de máquinas virtuais, programação linear inteira mista.

MATHEMATICAL MODEL FOR VIRTUAL MACHINE CONSOLIDATION

ABSTRACT: Recently, the popularization of the Internet has led to an increase in the demand for computing resources of high capacity and availability. The elevated investment in computing resources, combined with maintenance and operation costs, has induced many companies to outsource their data centers. Cloud computing arises as a model that provides computing resources on-demand to users in a pay-as-you-go subscription. Companies such as Amazon, Google, and Facebook have invested in cloud computing, offering several services and applications to their users. These data centers have been responsible for roughly 2% of global power consumption. Techniques such as server virtualization have been employed to reduce operation and power consumption costs. Virtual machine (VM) consolidation aims to reallocate VMs to a reduced number of PMs using migration. However, migration can lead to VM performance degradation, penalizing cloud service providers, according to the service level agreement established with the user. There are several works in recent literature using heuristics to solve the VM Consolidation Problem (VMCP). This work uses exact models to find the optimal solution to the VMCP, through mixed-integer linear programming. Results using the CloudSim Plus simulator, 10 days of the PlanetLab trace, for four types of VMs, and setup of 800 PMs, have shown that the proposed exact model finds the optimal solution in at most 190 seconds.

KEYWORDS: cloud computing, virtual machines migration, mixed-integer linear programming.

1 | INTRODUÇÃO

A popularização da Internet nos últimos anos tem aumentado a demanda por recursos computacionais. Pessoas de diferentes áreas acessam esses recursos através de centros de dados, que tiveram que crescer em tamanho para acomodar a demanda. A computação em nuvem surgiu como um modelo para acessar recursos computacionais através de pagamento de serviços sob demanda, fazendo que os centros de dados alcançassem um novo grau de importância.

Almejando melhorar a utilização de recursos de centros de dados em nuvens (*cloud data centers* - CDCs), reduzir os custos de capital (*capital expenditures* - CAPEX) e os custos operacionais (*operational expenditures* - OPEX), máquinas físicas (*physical machines* - PM) usam virtualização, uma camada de abstração de software que permite múltiplas instâncias de sistemas operacionais executem em uma única PM (BARHAM et al., 2003). Apesar disso, recentemente o consumo de energia de CDCs vem ganhando importância, sendo estimado em aproximadamente 2% de toda energia consumida globalmente (ARROBA et al., 2015).

Grandes empresas estão investindo em computação em nuvem verde, almejando melhorar sua eficiência energética. A Google construiu um centro de dados que é resfriado

utilizando a água fria do mar da Finlândia (GOOGLE, 2020). Além disso, as empresas Amazon e Facebook se comprometeram a energizar suas instalações usando 100% de energias renováveis (AMAZON, 2020; FACEBOOK, 2020)

Contudo, empresas pequenas não possuem dinheiro para investir em tecnologia de ponta para melhorar a eficiência energética de seus CDCs. Logo, outra forma alternativa de reduzir o consumo de energia é o gerenciamento eficiente de recursos. A consolidação de máquinas virtuais surge como uma alternativa para reduzir o consumo de energia. Esta técnica visa reduzir a quantidade de máquinas físicas ativas e conseqüentemente reduzir o consumo de energia (BELOGLAZOV; BUYYA, 2010).

Entretanto, desligar máquinas físicas pode reduzir a capacidade de processamento do CDC e afetar a qualidade de serviço (quality of service - QoS) do usuário, acarretando no problema da consolidação de máquinas virtuais (*virtual machine consolidation problem* - VMCP).

1.1 OBJETIVOS

Na literatura recente, são encontrados diversos trabalhos que utilizam heurísticas para solucionar o problema da consolidação de máquinas virtuais. Entretanto, existe uma lacuna na literatura de métodos exatos que resolvam o VMCP.

O objetivo deste trabalho é apresentar um método exato para melhorar a eficiência energética em centro de dados em nuvem enquanto mantém a qualidade de serviço. Para isso, é proposto um novo modelo matemático que considera o tempo de solução. Isso é particularmente importante nesse contexto, pois o objetivo é otimizar continuamente o CDC. Tempos longos de solução são inaceitáveis, pois a carga de trabalho das VMs pode variar dinamicamente em curto prazo.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os conceitos básicos, que tratam de computação em nuvem, migração e consolidação de máquinas virtuais e do problema do empacotamento.

2.1 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A computação em nuvem é um modelo de negócio que permite aos usuários acessarem e gerenciarem um conjunto de recursos computacionais sob demanda (MELL; GRANCE, 2011). Consumidores de serviços em nuvem negociam o Acordo de Nível de Serviço (*Service Level Agreement* - SLA) com os provedores de serviço em nuvem (*Cloud Service Providers* - CSP). O SLA é um acordo legal entre as partes envolvidas onde os Objetivos de Nível de Serviço (*Service Level Objectives* - SLO), ou seja, a qualidade de serviço esperada (*Quality of Service* - QoS) é definida em termos dos Indicadores de Nível de Serviço (*Service Level Indicators* - SLI), que são características mensuráveis do

serviço fornecido (BEYER et al., 2016).

Os provedores de serviço em nuvem provêm três tipos de serviços principais (MELL; GRANCE, 2011): *Software as a Service* (SaaS) permite que consumidores tenham acesso a soluções de *software* hospedadas nas instalações do CSP; *Platform as a Service* (PaaS) oferece ambientes para desenvolvimento, teste e implantação de aplicações; e *Infrastructure as a Service* (IaaS) provê acesso a recursos computacionais sob demanda que serão usados de acordo com a demanda do usuário.

2.2 MIGRAÇÃO DE MÁQUINAS VIRTUAIS

A migração de máquinas virtuais, é uma funcionalidade provida pelos *hypervisors*, que transfere o estado dos recursos virtuais de uma VM entre PMs distintas, permitindo balanceamento de carga, consolidação da carga de trabalho, gerenciamento do consumo de energia e manutenção transparente (STRUNK, 2012). A migração pode ser usada para melhorar a utilização de recursos e reduzir o consumo de energia. Contudo, a migração de VMs tem impacto negativo na QoS, já que durante o processo, existe *overhead* de banda e de CPU.

Em geral, CDCs modernos utilizam dispositivos de armazenamento em rede (*network-attached storage* - NAS). Então, a migração de VMs usualmente transfere apenas as páginas da memória RAM e o estado do CPU entre as PMs, utilizando uma combinação das seguintes técnicas (CLARK et al., 2005):

- *push*: páginas da VM original, executando na PM fonte, são transferidas para a PM destino. Se as páginas enviadas se tornarem sujas, devem ser reenviadas;
- *stop-and-copy*: a VM original cessa sua execução na PM fonte e suas páginas de memória são transferidas para a PM destino. Depois que as páginas foram transferidas com sucesso, a VM pode retomar sua execução na PM destino;
- *pull*: a nova VM, executando na PM destino, faz requisições das páginas da VM original, executando na PM fonte, em caso de ocorrência de falta de página.

As técnicas mencionadas acima podem ser utilizadas para desenvolver algoritmos de migração de VMs que podem ser estáticos ou frias (*non-live*, a VM para de executar durante o processo de migração) e a quente (*live*, a VM continua executando enquanto suas páginas de memória estão sendo transferidas). O desempenho do algoritmo de migração depende do tipo de carga de trabalho executada. Se a taxa de páginas sujas da carga de trabalho é maior que a banda, uma combinação das fases de *stop-and-copy* e *pull* são preferidas, visto que a fase de *push* transferiria diversas páginas de memória desnecessariamente. Contudo, se a carga de trabalho não faz escritas extensivamente, uma combinação das fases de *push* e *stop-and-copy* seria capaz de prover um equilíbrio entre tempo de migração e *downtime* (tempo em que a VM está inoperante).

2.3 CONSOLIDAÇÃO DE MÁQUINAS VIRTUAIS

O consumo de energia de uma PM, que usualmente apresenta consumo de energia estático (sem carga) entre 50% a 70% do seu consumo máximo, pode ser aproximado por uma função linear de sua utilização de CPU como exibido pela Equação (1) (FAN; WEBER; BARROSO, 2007). Dessa forma, é importante colocar as PMs em modos de baixo consumo de energia visto que a utilização das PMs em um CDC varia de 10% a 50% (BARROSO e HÖLZLE, 2007).

$$P(u) = P_{estático} + (P_{máximo} - P_{estático}) \times u \quad (1)$$

A consolidação de VMs é uma técnica que reduz o consumo de energia de um CDC ao colocar PMs ociosas em modos de economia de energia (HERMENIER; LORIAN; MENAUD, 2006). As VMs podem ser dinamicamente realocadas para outras PMs através da migração. O problema da consolidação dinâmica de VMs pode ser dividido em quatro subproblemas (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012):

- detecção de PMs subutilizada: decide se uma PM está subutilizada (ociosa) de acordo com a carga de trabalho atual;
- detecção de PMs sobrecarregadas: decide se uma PM está sobrecarregada de acordo com a carga de trabalho atual;
- seleção de VMs: seleciona VMs das PMs para serem migradas. Se a PM está subutilizada, todas as VMs são selecionadas da mesma, enquanto que se a PM está sobrecarregada, seleciona algumas VMs para reduzir a carga da PM;
- alocação de VMs: encontra um novo mapeamento entre as VMs e PMs que seja eficiente em energia e que evite violações do SLO.

2.4 PROBLEMA DO EMPACOTAMENTO

O problema do empacotamento (*Bin Packing Problem* - BPP) é um problema de otimização combinatória NP-Difícil, que pode ser formalmente definido da seguinte forma (MARTELLO; TOTH, 1990): dado um conjunto de itens $N=\{1, \dots, n\}$, cada um dos quais possui um volume $v_i \in \mathbb{R}_{>0}$, e um conjunto de pacotes candidatos $M=\{1, \dots, m\}$, cada um dos quais possui a mesma capacidade de volume máxima $V \in \mathbb{R}_{>0}$, o objetivo do BPP é alocar os itens ao menor número de pacotes possível, respeitando a atribuição dos mesmos e a capacidade de cada pacote. Assuma que $y_j \in \{0, 1\}$ vale 1 se o pacote j é usado, 0 caso contrário, e que $x_{ij} \in \{0, 1\}$ vale 1 se o item i foi atribuído ao pacote j e 0 caso contrário.

Segue um modelo matemático para o BPP.

$$\min \quad \sum_{j=1}^m y_j \quad (2)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq V y_j \quad \forall j \in M, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (4)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in M, \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (6)$$

A função objetivo (2) minimiza o número total de pacotes a serem usados. As restrições (3) garantem que a soma dos volumes do item de um pacote não excedam sua capacidade máxima. A atribuição de cada item em no máximo um pacote é garantido pelas restrições (4). O domínio binário das variáveis y_j e x_{ij} são garantidas pelas restrições (5) e (6), respectivamente.

2.4.1 HEURÍSTICAS

Uma vez que o BPP é NP-Difícil, um algoritmo eficiente que resolve o problema na otimalidade, em tempo polinomial de execução, provavelmente não existe a menos que $P = NP$. Dessa forma, heurísticas têm sido utilizadas para se obter soluções subótimas em tempo polinomial de execução. A seguir estão alguns exemplos de heurísticas clássicas para o BPP (MARTELLO; TOTH, 1990).

Na heurística *Next Fit* (NF), apenas um pacote está aberto por vez e os itens são atribuídos ao mesmo se não violam sua capacidade. Quando um item não puder ser inserido em um pacote, o mesmo é fechado e um novo pacote é aberto. O processo continua até que não reste nenhum item para ser atribuído. *First Fit* (FF) abre e rotula os pacotes para indexação. A heurística atribui o item ao pacote adequado com o menor index. Um novo pacote é aberto quando nenhum dos pacotes abertos pode armazenar o item. Por fim, *Best Fit* (BF) é uma variação da FF e atribui itens aos pacotes com menor capacidade residual.

As heurísticas descritas acima são *online*, no sentido de que elas não conhecem a distribuição dos itens *a priori*. Se os itens são previamente conhecidos, eles podem ser armazenados em ordem decrescente de volume e usados como entrada para NF, FF, e BF, resultando nas heurísticas *offlines Next Fit Decreasing* (NFD), *First Fit Decreasing* (FFD), and *Best Fit Decreasing* (BFD), respectivamente.

3 | TRABALHOS RELACIONADOS

Muitas heurísticas foram propostas para o problema da consolidação de máquinas virtuais (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012a). Nesses trabalhos, PMs são classificadas de acordo com a sua carga de trabalho baseada em técnicas que utilizam limiares estáticos. *Single Threshold* (ST) é uma heurística que mantém a utilização de CPU das PMs abaixo de um limiar superior de utilização, através da seleção de VMs para migração a fim de mitigar a superutilização das PMs.

Três outras heurísticas almejam manter a utilização de CPU de uma PM entre limiares superior e inferior, diferindo apenas na maneira como as VMs são selecionadas para migração (BELOGLAZOV; ABAWAJY; BUYYA, 2012). *Minimization of Migrations* (MM) busca minimizar o número total de migrações, reduzindo os *overheads* de desempenho e

energia causados pelo processo de migração. *Highest Potential Growth* (HPG) seleciona a VM com a menor utilização de CPU com relação a sua capacidade, visando prevenir seu aumento que poderia acarretar em violação do SLO. Por fim, *Random Choice* (RC) escolhe as VMs aleatoriamente.

As VMs são atribuídas a novas PMs usando o *Power Aware BFD* (PABFD) que é uma variação da heurística BFD para o BPP. Em cada iteração do PABFD, uma VM é levada em consideração e a heurística estima, para cada PM, seu consumo de energia caso recebesse a VM atual. Então, a VM é atribuída a PM que apresenta menor acréscimo no consumo de energia. O processo é repetido até que todas as VMs sejam atribuídas a alguma PM.

Diferentemente dos trabalhos supracitados, este trabalho introduz um método exato para resolver o problema de consolidação de VMs. Existe um limite, contudo, no tamanho das instâncias que podem ser resolvidas através de métodos exatos em tempo hábil. Embora abordagens híbridas não sejam o foco deste trabalho, uma estratégia deste tipo, poderia utilizar os algoritmos de classificação acima como um procedimento de pré-processamento, a fim de reduzir o número de PMs e VMs que seria fornecido ao método exato.

4 | METODOLOGIA

O VMCP é formalizado como descrito a seguir. Dado um centro de dados em nuvem heterogêneo $CDC=(V,P,R)$, em que $V=\{1,\dots,n\}$ é um conjunto de n VMs sendo atendidas pelo CDC, $P=\{1,\dots,m\}$ é o conjunto de PMs disponíveis no CDC para hospedagem de VMs, e $R=\{1,\dots,l\}$ é o conjunto de recursos (CPU, RAM, disco) sendo considerados durante o processo de otimização.

Sejam r_{ik} e u_{ik}^v as quantidades de recursos k (em unidades arbitrárias), requisitadas e usadas pela VM i , respectivamente, e \bar{x}_{ij} a alocação da VM i antes do processo de otimização, em que \bar{x}_{ij} é igual a 1 se a VM i foi atribuída a PM j , 0 caso contrário. Além disso, sejam $\overline{p_{j,estático}}$ e $\overline{p_{j,máximo}}$ o consumo de energia estático e máximo da PM j , respectivamente, e seja $\overline{p_j}$ seu consumo de energia antes da otimização. Cada PM j possui capacidade c_{jk} do recurso k (em unidades arbitrárias).

O objetivo do VMCP é encontrar um novo mapeamento entre VMs e PMs, minimizando o número de PMs ativas. Neste problema, VMs são realocadas dinamicamente através migração a quente de VMs. Como o processo de migração leva ao acréscimo no consumo de energia e a degradação do desempenho, o novo mapeamento deve ser conservador (em algum nível), a fim de minimizar o número de migrações desnecessárias.

Todas as VMs devem ser alocadas ao final da otimização, cada VM pode ser alocada no máximo a uma PM, e o novo mapeamento não pode violar as restrições de capacidade

de cada PM. De maneira geral, existem dois tipos de restrições de capacidade: baseado em reserva e baseado em demanda (WOLKE et al., 2015). O primeiro considera o r_{ik} para calcular a capacidade residual e estimar o consumo de energia, enquanto o último usa o u_{ik}^v . A diferença é que, em um ambiente com excesso de demandas, mais VMs podem ser consolidadas em um PM, com base no pressuposto de que as VMs não utilizam totalmente seus recursos na maior parte do tempo. Isso pode reduzir o consumo de energia, mas pode causar mais SLAVs do que a alocação baseada em reserva.

Seja $x_{ij} \in \{0, 1\}$ a alocação da VM após a otimização, onde x_{ij} é 1 se a VM l foi atribuída a PM j , 0 caso contrário. $p_j \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ é o consumo de energia da PM j após a otimização, definido em termos da sua utilização de CPU atual $u_{j,CPU}^p \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, dada em porcentagem de uso.

A Tabela 1 apresenta uma visão geral da notação usada para definir o modelo matemático, incluindo conjuntos, parâmetros de entrada e variáveis de decisão.

Conjuntos	
$V = \{1, \dots, n\}$	conjunto de VMs sendo alocadas no CDC
$R = \{1, \dots, l\}$	conjunto de recursos levados em consideração
$P = \{1, \dots, m\}$	conjunto de PMs sendo alocadas no CDC
Parâmetros de entrada	
r_{ik}	quantidade requisitada pela VM l do recurso k
u_{ik}^v	quantidade utilizada pela VM l do recurso k
c_{jk}	capacidade total da PM j do recurso k
$\underline{p}_{j,estático}$	consumo de energia estático da PM j
$\underline{p}_{j,máximo}$	consumo de energia máximo da PM j
Variáveis de decisão	
x_{ij}	1 se a VM l alocada na PM j depois da otimização, 0 caso contrário
p_j	consumo de energia da PM j após a otimização
$u_{j,CPU}^p$	quantidade de CPU utilizada pela PM j

Tabela 1: notação usada na definição do modelo matemático.

4.2. MODELO MATEMÁTICO

No modelo apresentado a seguir, as restrições de capacidade são computadas em termos de r_{ik} , portanto, usando alocação baseada em reserva. Porém, essas restrições podem ser modificadas para alocação baseada em demanda, alterando r_{ik} para u_{ik}^v

$$\min \quad \sum_{j=1}^m p_j \quad (7)$$

$$\text{s.a.} \quad u_{j,CPU}^p = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} \times u_{i,CPU}^v}{c_{j,CPU}}, \quad \forall j \in P, \quad (8)$$

$$p_j = \underline{p}_{j,estático} + (\underline{p}_{j,máximo} - \underline{p}_{j,estático}) \times u_{j,CPU}^p \quad \forall j \in P, \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
p_j &\geq 0, & \forall i \in P, & (10) \\
p_j &\leq \underline{p_{j,máximo}}, & \forall j \in P, & (11) \\
\sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, & \forall i \in V, & (12) \\
\sum_{i=1}^n r_{ik} x_{ij} &\leq c_{jk}, & \forall j \in P, \forall k \in R & (13) \\
x_{ij} &\in \{0, 1\}, & \forall i \in V, \forall j \in P & (14) \\
p_j &\in \mathbb{R}_{\geq 0}, & \forall j \in P & (15)
\end{aligned}$$

A Equação (7) introduz a função objetivo que minimiza o consumo de energia das PMs. As Restrições (8) computam o consumo de energia de uma PM utilizando a Equação (1). Os limites inferior e superior do consumo de energia são dados pelas Restrições (9) e (10), respectivamente. A atribuição de todas as VMs é assegurada pelas Restrições (11). A alocação baseada em reserva é garantida pelas Restrições (12). Por fim, as Restrições (13) e (14) definem os domínios das variáveis de alocação das VMs (binárias) e das variáveis de consumo de energia (contínuas).

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo proposto foi avaliado no simulador CloudSim Plus (FILHO et al., 2017), versão 5.0.0, usando o *trace* do PlanetLab (PARK; PAI, 2006) que contém registros de utilização de CPU de dez dias aleatórios dos meses de Março e Abril de 2011. Gurobi 8.1 foi utilizado para implementar e resolver o modelo matemático. Foram utilizados os parâmetros padrões do Gurobi. As simulações e o *solver* foram executados em uma máquina com um processador Intel® Core™ i7-4770 @ 3.40 GHz, 8 GB de RAM e sistema operacional Linux.

Um CDC com 800 PMs foi simulado da mesma maneira como o experimento feito em (BELOGLAZOV; BUYYA, 2012b). Todas as PMs tem 4 GB de RAM, 1 Gb/s de banda e 1 TB de disco. As PMs diferem no processador: 400 PMs são criadas com uma CPU de dois núcleos simulando o Intel® Xeon® 3040 @ 1.8 GHz, que executa 1860 MIPS (Milhões de Instruções por Segundo); enquanto as outras 400 PMs possuem uma CPU de dois núcleos simulando o Intel® Xeon® 3075 @ 2.66 GHz com 2660 MIPS. O consumo de energia das PMs é extraído do *benchmark* SPECpower_ssj@2008 das máquinas HP ProLiant ML110 G4 e HP ProLiant ML110 G5.

Quatro tipos de VMs foram criadas com configurações similares às da Amazon *Elastic Cloud Computing*. Todas as VMs são criadas com uma única CPU virtual (vCPU), 100 Mb/s de banda, e tamanho do disco de 2,5 GB. As diferenças entre cada instância estão na quantidade de MIPS e na capacidade de RAM de cada VM: *High-CPU Medium* tem 2500 MIPS e 870 MB de RAM; *Extra Large* tem 2000 MIPS e 1740 MB de RAM; *Small* tem 1000 MIPS e 1740 MB de RAM; por fim, *Micro* possui 500 MIPS e 613 MB de RAM.

A Tabela 2 mostra o resumo dos resultados para os 10 dias do dataset. A solução é dada em Watts, já neste trabalho, não foi realizada otimização contínua dos cenários.

<i>Trace</i>	Número de VMs	Tempo (s)	Solução (W)
20110303	1052	60,84	73.047,6
20110306	898	45,60	72.832,8
20110309	1061	44,69	73.092,4
20110322	1516	190,08	73.189,2
20110325	1078	62,37	72.963,7
20110403	1463	100,66	73.321,7
20110409	1358	94,76	73.221,9
20110411	1233	62,59	73.176,2
20110412	1054	55,56	72.953,4
20110420	1033	52,77	72.917,1

Tabela 2: resumo dos resultados.

Conforme visto na Tabela 2, a solução ótima para o problema foi encontrada em menos de 190 segundos para todos os dias do *trace*. Dessa forma, nota-se que é possível empregar métodos exatos para instâncias pequenas e médias para o VMCP. Pela tabela, também é possível notar que o número de VMs não é um fator exclusivo para redução do tempo de busca da solução. Assim, a utilização das VMs também é um fator importante no tempo de busca da solução ótima. A principal diferença, entre o modelo proposto e o BPP tradicional, é o fato de que o pacote pode estar sendo parcialmente utilizado (PM que não está sendo 100% utilizada). Isto faz com que as variáveis que determinam se uma PM está ativa não sejam mais necessárias, reduzindo a complexidade do modelo.

Além disso, o mapeamento inicial das VMs também pode impactar no tempo de busca da solução ótima. Neste trabalho as VMs foram atribuídas aleatoriamente às PMs. Contudo, outros escalonadores devem ser testados para determinar se existe algum método mais eficiente.

Visto que o modelo proposto utiliza o método de alocação baseada em reserva, ele não viola o SLA em um dado instante de tempo. Porém, dada a limitação deste trabalho de não realizar a otimização contínua dos cenários, deve-se analisar em trabalhos futuros, qual o impacto da migração nesses casos e a comparação do método de alocação baseada em reserva e baseada em demanda.

6 | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs um novo modelo para o VMCP. Como visto nos resultados, o tempo de solução até a otimalidade é aceitável para instâncias com 800 PMs e

aproximadamente 1500 VMs. Contudo, como mencionado anteriormente, ainda há a necessidade de avaliar o desempenho do modelo em um cenário com otimização contínua.

Em trabalhos futuros, além das limitações discutidas anteriormente, algumas opções podem ser exploradas, como: uso de dados históricos para fornecer robustez ao modelo atual; uma combinação de heurísticas e métodos exatos para melhorar o tempo de solução para instâncias maiores; exploração de desigualdades válidas e geração de colunas para o VMCP.

REFERÊNCIAS

AMAZON. **AWS & Sustainability**. 2020. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/about-aws/sustainability/>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

ARROBA, P. et al. DVFS-aware consolidation for energy-efficient clouds. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL ARCHITECTURE AND COMPILATION, 24., 2015, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 2015. p. 494–495.

BARHAM, P. et al. Xen and the art of virtualization. **ACM SIGOPS Operating Systems Review**, New York, v. 37, n. 5, p. 164–177, 2003.

BARROSO, L. A.; HÖLZLE, U. The case for energy-proportional computing. **Computer**, Piscataway, v. 40, n. 12, 2007.

BELOGLAZOV, A.; ABAWAJY, J.; BUYYA, R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing. **Future Generation Computer Systems**, Amsterdam, v. 28, n. 5, p. 755–768, 2012.

BELOGLAZOV, A.; BUYYA, R. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, Hoboken, v. 24, n. 13, p. 1397–1420, 2012.

BEYER, B. et al. **Site Reliability Engineering: how Google runs production systems**. Sebastopol: O’Reilly, 2016.

CLARK, C. et al. Live migration of virtual machines. In: SYMPOSIUM ON NETWORKED SYSTEMS DESIGN & IMPLEMENTATION, 2., 2005, Boston. **Proceedings...** Boston: USENIX, 2005. p. 273–286.

FACEBOOK. **Sustainable data centers**. 2020. Disponível em: <<https://sustainability.fb.com/innovation-for-our-world/sustainable-data-centers/>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

FAN, X.; WEBER, W.-D.; BARROSO, L. A. Power provisioning for a warehouse-sized computer. **ACM SIGARCH Computer Architecture News**, New York, v. 35, n. 2, p. 13–23, 2007.

FILHO, M. C. S. et al. CloudSim Plus: a cloud computing simulation framework pursuing software engineering principles for improved modularity, extensibility and correctness. In: IFIP/IEEE SYMPOSIUM ON INTEGRATED NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT, 15., 2017, Lisbon. **Proceedings...** Lisbon: IEEE, 2017. p. 400–406.

GOOGLE. **Data Centers**. 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/hamina/>>. Acesso em: 6 mar. 2020.

HERMENIER, F.; LORANT, N.; MENAUD, J.-M. Power management in grid computing with Xen. In:

FRONTIERS OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND NETWORKING, 4., 2006, Sorrento.
Proceedings... Sorrento: Springer, 2006. p. 407–416.

MARTELLO, S.; TOTH, P. **Knapsack problems: algorithms and computer implementations**. Chichester: J. Wiley, 1990.

MELL, P.; GRANCE, T. et al. **The NIST definition of cloud computing**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2011.

P

ARK, K.; PAI, V. S. CoMon: a mostly-scalable monitoring system for PlanetLab. **ACM SIGOPS Operating Systems Review**, New York, v. 40, n. 1, p. 65–74, 2006

STRUNK, A. Costs of virtual machine live migration: a survey. In: IEEE WORLD CONGRESS ON SERVICES, 8., 2012, Honolulu. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2012. p. 323–329

WOLKE, Andreas et al. More than bin packing: Dynamic resource allocation strategies in cloud data centers. **Information Systems**, v. 52, p. 83-95, 2015.

CAPTURE THE FLAG: MÉTODO DE APRENDIZADO PARA A DISCIPLINA DE FORENSE COMPUTACIONAL EM UMA UNIVERSIDADE PÚBLICA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 08/03/2020

Carlos Eduardo de Barros Santos Júnior

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/1334493042199015>

Ana Clara Nobre Mendes

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte

Jhonattan Carlos Barbosa Cabral

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/5614754085757893>

Juliana Barbosa dos Santos

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/3562270468716447>

Erick de Oliveira Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/3654048020547743>

Pedro Henrique Rodrigues Emerick

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal - Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/4315993465853700>

assimilação do conteúdo passado em sala de aula nem sempre é uma tarefa trivial. Por isso, novas estratégias são exploradas a fim de garantir uma melhor experiência no ensino. Uma delas pode ser a Capture The Flag (CTF), uma competição focada na resolução de desafios de segurança da informação e que podem abordar questões relacionadas à Forense Computacional. Este estudo tem o objetivo de utilizar a competição para mensurar os conhecimentos adquiridos por meio da disciplina de Forense Computacional ofertada através de uma Universidade Pública.

PALAVRAS-CHAVE: Capture the Flag, Forense, Segurança, Educação

CAPTURE THE FLAG: LEARNING METHOD FOR COMPUTER FORENSICS DISCIPLINE AT A PUBLIC UNIVERSITY

ABSTRACT: Effectively evaluating the assimilation of content passed in the classroom is not always a trivial task. Therefore, new strategies are explored to ensure a better teaching experience. One of them may be the Capture The Flag (CTF), is a competition focused on solving information security challenges and that can approach issues related to computer forensics. This study aims to use the competition

RESUMO: Avaliar de forma eficiente a

to measure the knowledge acquired through the discipline of Computational Forensics offered by a public university.

KEYWORDS: Capture the Flag, Forensics, Security, Education

1 | INTRODUÇÃO

A utilização da internet se tornou intrínseca na sociedade atual, por exemplo, muitas pessoas utilizam alguma ferramenta para troca de mensagens instantâneas, transações bancárias, comércio eletrônico, e etc [Tanenbaum and Wetherall, 2011]. Sendo assim, deve existir mecanismos para assegurar que os dados usados nos serviços estejam seguros.

Para introduzir e trabalhar os conceitos ligados à área da Segurança da Informação, foi ofertada por uma Universidade Pública a disciplina de Forense Computacional, uma das áreas da ciência forense que está em constante crescimento [Garfinkel, 2010]. Durante as aulas, surgiu a necessidade de saber se os conhecimentos estavam sendo assimilados de forma correta, decidiu-se então aplicar desafios com situações que exigissem dos participantes os conhecimentos previamente apresentados durante as aulas. Por isso, foi pensado em produzir uma competição no modelo “capture a bandeira” ou CTF, do inglês Capture The Flag. Nesse aspecto que este artigo foi escrito.

2 | FORENSE COMPUTACIONAL

O avanço da tecnologia não trouxe apenas benefícios para a sociedade, trouxe também o aprimoramento de algumas práticas criminosas e o surgimento de outras. Para apoiar o combate a estas práticas que surge a computação forense com o objetivo de determinar a dinâmica, mirando os esforços na identificação e no processamento de evidências digitais em provas materiais de crime [da Silva Eleutério and Machado, 2011].

A resolutividade de práticas criminosas envolvendo dispositivos computacionais pode requerer uma análise minuciosa dos equipamentos responsáveis pelo armazenamento dos dados, em sistemas de arquivos com propriedades de aglomeração de dados consideravelmente boas, arquivos excluídos podem permanecer intactos durante anos. Ou seja, informação de um arquivo excluído são como um fóssil: um esqueleto pode não ter a ossada completa, mas o fóssil permanece, imutável, até ser destruído [Farmer and Venema, 2008].

3 | CAPTURE THE FLAG

No âmbito da tecnologia da informação, competições de CTF envolvem diferentes

habilidades dos jogadores para resolução de desafios de segurança da informação. Segundo [Magalhaes et al., 2017], uma competição pode levar até vários dias e as equipes devem concluir o máximo de desafios de segurança cibernética que puderem.

No meio acadêmico e profissional muitas instituições têm promovido competições com este tipo de abordagem, a fim de melhorar os conhecimentos em cibersegurança e apoiar no aumento de profissionais nessa área [Matias et al., 2017]. Ademais, o CTF foi escolhido como uma maneira de mensurar o aprendizado da turma de Forense Computacional, pois como concluído por [McDaniel et al., 2016], esta metodologia proporciona a oportunidade dos alunos terem contato com a perícia forense similar ao mundo real.

4 | METODOLOGIA

O estudo foi realizado utilizando uma amostragem de 12 alunos efetivamente matriculados na disciplina de computação forense. Com desafios acessíveis por um período de 7 dias e para tentar solucioná-los, além dos usuários terem que se cadastrar na plataforma utilizada, teriam que estar em sala de aula. Após o estudo esperava-se que grande parte dos participantes demonstrassem um bom desempenho, o que seria caracterizado pela resolução de pelo menos metade dos desafios impostos.

4.1 PLATAFORMA CTF

A plataforma utilizada foi a do grupo CTFd e, atualmente, encontra-se disponível em <https://ctfd.io/>. O uso desta plataforma nos permite analisar os dados de cada jogador, assim como do grupo de participantes, nos entregando informações, como submissões, quantidade de acertos e erros por desafio. A análise destes dados é que ao fim compõe nossas conclusões diante da absorção do conteúdo ministrado na disciplina.

4.2 DESAFIOS DA COMPETIÇÃO

Como o tempo de execução limitado, foram estabelecidos um total de 6 desafios para que fosse possível a realização de um desafio diariamente com mais um dia extra.

Um ponto importante a se destacar, é que o número máximo de usuários em um desafio foi de apenas 9, dado que foi divulgado o CTF como uma atividade avaliativa para uma disciplina de 19 alunos oficialmente matriculados. Um número considerado pequeno, representando aproximadamente 47% dos alunos, isto para o melhor caso apresentado, mostrando a falta de interesse pela maior parte da turma em aplicar as técnicas assimiladas.

No primeiro desafio foi fornecido um arquivo de log possuindo 3550 linhas. Na linha 239, foi inserido a flag. Os jogadores tinham como objetivo filtrar o conteúdo do log em busca da string F0RS3NS3, identificar o método de codificação utilizado para esconder o texto original e, por fim, decodificá-lo. No desafio seguinte, “Bela Imagem”, foi decidido

avaliar a percepção e os conhecimentos de esteganografia dos alunos. Neste caso, uma mensagem foi ocultada em um arquivo com extensão (.jpg).

Para o terceiro desafio, “Help!”, foi lançada uma história fictícia de uma situação de emergência em que os protagonistas possuíam apenas uma forma de se salvar. Foi entregue uma saída simples com o código morse. Neste caso, descobrir a flag era o menor dos objetivos, pois a identificação do tipo de codificação utilizada era a informação mais relevante do desafio. No desafio “Periciando”, o quarto, o objetivo foi apresentar o que seria uma flag aos jogadores. Fornecendo um arquivo com extensão (.pdf) em que o conteúdo não se adequava ao formato indicado pela extensão. Por fim, executando o arquivo com um software adequado para a extensão correta, o jogador teria um contato direto com a flag utilizada.

No desafio “Pendrive suspeito”, se trouxe um ambiente próximo ao real fornecido um disco particionado do tipo ext3. Em seguida, os participantes deveriam converter o disco para o formato (.vdi) e inicializá-lo em uma máquina virtual. Os competidores ao acessarem o disco, analisariam e procurariam por arquivos deletados, mas que ainda possuíam inodes alocados. Basicamente, inodes são as estruturas responsáveis por conter informações básicas sobre arquivos e pastas.

Similar ao desafio anterior, “Quem é Ká?”, trouxe uma resolução com algumas etapas forenses para recuperação de um arquivo apagado. Entretanto, o tipo de partição do disco estava em FAT, com setor de boot DOS/MBR. Após a identificação, os arquivos deveriam ser restaurado para análise sendo possível descobrir o nome verdadeiro de “Ka”.

5 | RESULTADOS

A primeira análise executada foi a relação entre a quantidade de tentativas para encontrar a resposta correta e os acertos. Pôde-se notar na figura 1 que o desafio ao qual foi realizado a maior quantidade de tentativas para se obter a resposta correta foi o “Help!”, contrariando o que era esperado, uma vez que se tratava de um desafio simples e que não envolvia nenhum conhecimento profundo de análise forense, apenas o conceito de Código Morse.

Em contrapartida, o desafio “Pendrive Suspeito” que requeria um conhecimento mais avançado em análise de disco e sistemas de arquivos foi um que teve menos erros. Sendo assim, os alunos que conseguiam executar a sequência de passos chegariam na resposta sem uma quantidade elevada de tentativas.

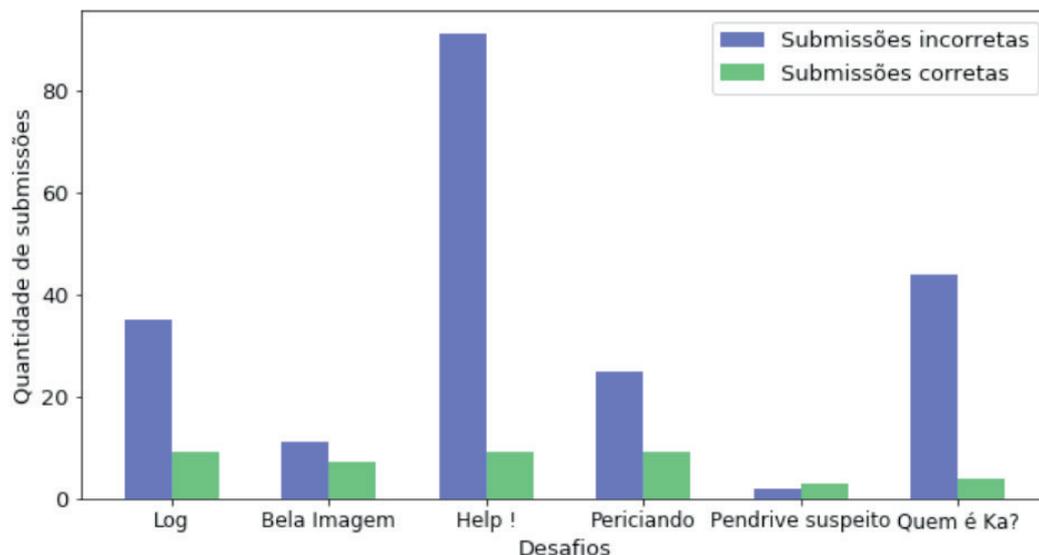


Figura 1. Total de submissões por desafio

O desafio “Help!”, teve o maior número de respostas, ou seja, maior participação dos alunos (9 no total). Isto se deve à este desafio ser o mais simples dentre todos. No desafio “Periciando” foi obtido uma menor adesão por parte dos alunos, o que foi inesperado já que o arquivo fornecido tinha como extensão (.pdf) e na realidade era uma imagem. Ao identificar isto, a flag, estava de fácil acesso.

O desafio “Quem é Ka?” era semelhante ao do desafio “Pendrive Suspeito”, o que consequentemente fez com que os resultados fossem semelhantes: número alto de submissões incorretas e pouca adesão dos alunos. Já no desafio “Pendrive Suspeito”, houve poucas tentativas e pouca adesão dos alunos, pois se tratava de um desafio mais difícil e com mais etapas para obter êxito. Porém, considerando que as metodologias para realização da análise forense de dispositivos suspeitos foram vistas em sala de aula, era esperado que mais alunos conseguissem realizar o desafio.

6 | CONCLUSÃO

O maior objetivo em utilizar uma competição do tipo CTF para avaliar os conhecimentos da turma de Forense Computacional é observar, principalmente, a postura do analista forense diante de investigações, que podem ser estressantes e necessitarem de diferentes tipos de conhecimentos, dependendo do tipo de perícia que se precisa realizar. Assim, foi observado que, apesar dos alunos terem absorvido bastante conteúdo oferecidos pela disciplina, a maioria não conseguiu sair da “zona de conforto” em relação a execução dos desafios. Os alunos que obtiveram êxito para concluir os desafios alcançaram melhores resultados no final da disciplina.

REFERÊNCIAS

- McDaniel, L.; Talvi, E.; Hay, B. **Capture the flag as cyber security introduction**. 49th Hawaii International Conference on System Sciences. 2016.
- da Silva Eleutério; P.; Machado, M. **Desvendando a Computação Forense**. NOVATEC. 2011.
- Garfinkel, S. L. **Digital forensics research: The next 10 years**. Elsevier Ltd. 2010.
- Matias, P.; Barbosa, P.; Cardoso, T.; Mariano, D.; Aranha, D. (2017). **Nizkctf: Anonint-
ractive zero-knowledge capture the flag platform**. IEEE Security & Privacy, p. 42-51. 2018.
- Farmer, D. and Venema, W. **Perícia forense computacional: teoria e prática aplicada : como investigar e esclarecer ocorrências no mundo cibernético**. PRENTICE HALL BRASIL. 2008.
- Magalhaes, L., Antonio Carlos F. Petri, Gabriel de S. Alves, C. A. C. M., and Matias, P.(2017). **Provisionamento automatizado de servidores para competições de segurança da informação**. XVII Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais - SBSeg 2017.
- Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. J. **Redes de Computadores**. Pearson Prentice Hall, 5 edition. 2011.

A METODOLOGIA EPRI PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS CIBERNÉTICOS NAS INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E SUA RELAÇÃO COM A NORMA IEC 62443-2-1

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 27/02/2020

Luiz Augusto Kawafune Campelo

OSIsoft do Brasil Sistemas Ltda

São Paulo – SP

RESUMO: O objetivo deste trabalho é discorrer sobre a metodologia desenvolvida pela EPRI (Electric Power Research Institute) para mapeamento de riscos cibernéticos de um conjunto de componentes, produzindo os denominados CSDS (Cyber Security Data Sheet).

Estes documentos mostrarão ao usuário os riscos cibernéticos associados a componentes, estratégias de mitigação e vulnerabilidades residuais (que não podem ser mitigadas pelo próprio componente), com interpretação mais simplificada do que as classificações CVE (Common Vulnerabilities and Exposures).

Os CSDS podem ser integrados ao CSMS (Cyber Security Management System) previsto na norma ISA/IEC 62443-2-1 sendo uma importante ferramenta de avaliação de riscos dada a sua escalabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Cibersegurança,

vulnerabilidades, CSDS, EPRI, TAM

EPRI METHODOLOGY FOR CYBER
RISK EVALUATION OF CRITICAL
INFRASTRUCTURES AND ITS
RELATIONSHIP WITH IEC 62443-2-1

ABSTRACT: The objective of this work is discuss about a methodology developed by EPRI (Electric Power Research Institute) of cyber risk mapping for a group of components, producing the so-called CSDS (Cyber Security Data Sheet).

These documents will expose to the user the cyber risks associated to components, mitigation strategies and residual vulnerabilities (which cannot be mitigated by the component itself), with a more simplified interpretation than the CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) classifications.

The CSDS can be aggregated to CSMS (Cyber Security Management System) from the standard ISA/IEC 62443-2-1, being an important tool for cyber risk evaluation given its scalability.

KEYWORDS: Cybersecurity, vulnerabilities, CSDS, EPRI, TAM

1 | INTRODUÇÃO

Quando falamos sobre segurança cibernética, normalmente nos recordamos de técnicas, tecnologias, ferramentas, incidentes e equipamentos ou sistemas para monitoramento. Nos últimos anos, a segurança cibernética tem ganho mais destaque nas empresas do setor, ainda mais pelo fato da necessidade de uma integração antes não vista entre os sistemas de IT (Information Technology) e OT (Operational Technology).

Com esse novo universo de aplicações, o que chamamos de “superfície de ataque” aumenta exponencialmente, dadas as características dos sistemas de IT (Information Technology) e OT (Operational Technology). E, por consequência, o trabalho das equipes responsáveis pela segurança cibernética das empresas aumenta no mesmo passo em que estas tecnologias convergem.

Este universo de aplicações e sistemas, que possuem suas próprias características (e, como todo componente de software, possui vulnerabilidades conhecidas e/ou ainda não conhecidas), introduzem elementos de risco em toda a infraestrutura. Risco este que deve ser apropriadamente mensurado e tratado.

A norma ISA/IEC 62443-2-1 estabelece que um Programa de Segurança para Sistemas de Controle Industriais deve contar com um CMMS (Cyber Security Management System) basicamente composto de três elementos: Políticas de Segurança, Contramedidas para mitigação de vulnerabilidades e Mecanismos de Implementação. Entretanto, a norma define que as metodologias utilizadas para cumprir com seus requisitos são arbitrários, ou seja, devem ser escolhidos pela organização.

Para abordar este tópico a EPRI (Electric Power Research Institute) introduz sua metodologia de avaliação e mapeamento de riscos cibernéticos produzindo os chamados CSDS (Cyber Security Data Sheet) que utilizam os mesmos conceitos observados no padrão OSHA 3514 (Occupational Safety and Health Administration) – Material Safety Data Sheet, utilizados pela indústria química e considerada uma das normas de referência para esta indústria.

A metodologia da EPRI (Electric Power Research Institute) utiliza o conceito de mitigação de vulnerabilidades em núcleos bem definidos, gerando como resultado o que chamamos de “Vulnerabilidades Residuais” que são vulnerabilidades que não podem (por quaisquer razões, sejam limitações do sistema ou infactibilidade mediante requisitos de negócio) ser mitigadas utilizando recursos do próprio sistema, mas que poderiam ser mitigadas, por exemplo, quando utilizados recursos do sistema ao qual ele interage ou se integra.

2 | A NORMA ISA/IEC 62443

A ISA/IEC 62443 é uma série de normativas que definem procedimentos para

desenvolver Sistemas Industriais de Automação e Controle sob estritas métricas de segurança cibernética. Estas normas são voltadas para os usuários finais, integradores de sistemas, profissionais de segurança cibernética e fabricantes de Sistemas de Controle Industriais (CYBER security standards, 2019).

Estes documentos foram originalmente lançados como ANSI/ISA-99 ou ISA 99 pelo fato de terem sido criados pela Sociedade Internacional de Automação (International Society of Automation – ISA) e lançados publicamente pelo Instituto Americano de Padrões Nacionais (American National Standards Institute – ANSI). Em 2010 estes conjuntos de normas foram numerados como ANSI/ISA-62443 com o intuito de alinhar a numeração da documentação ISA e ANSI com a Comissão Internacional Eletrotécnica (International Electrotechnical Commission – IEC) (CYBER security standards, 2019).

A FIGURA 1 mostra as categorias que fazem parte da norma ISA/IEC 62443. Todas as normas e relatórios técnicos estão organizados em quatro categorias gerais chamadas Geral, Políticas e Procedimentos, Sistemas e Componentes.

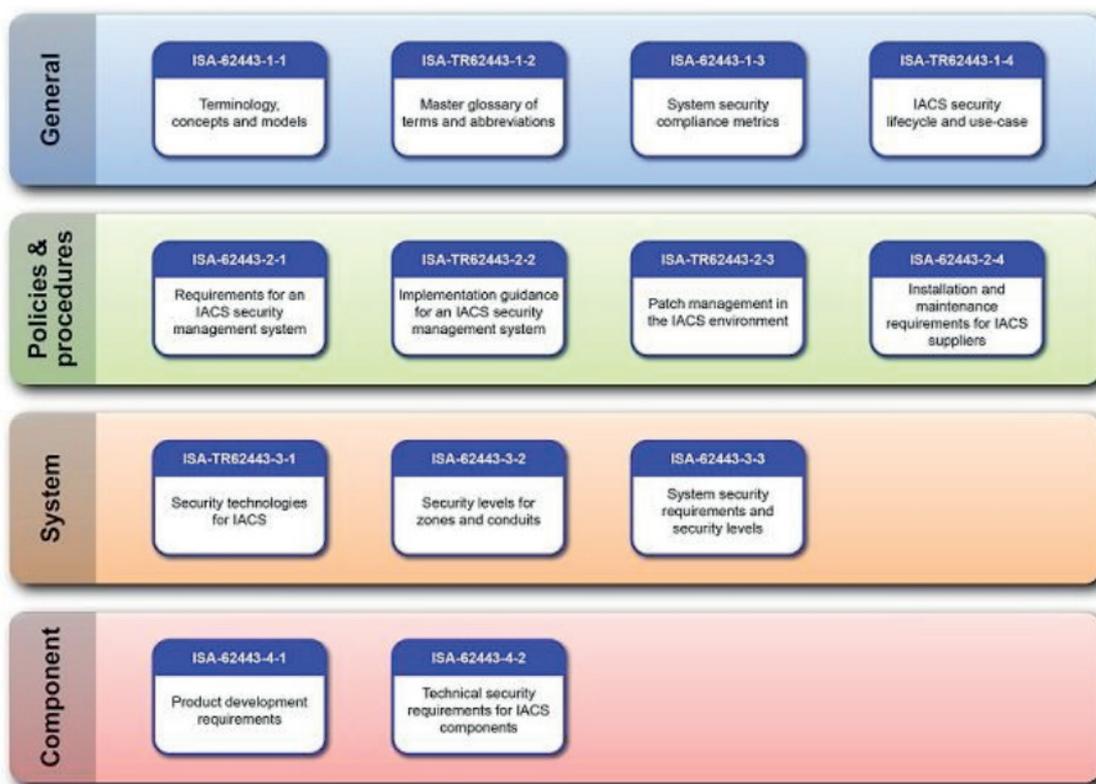


FIGURA 1 – A estrutura da norma ISA/IEC 62443

2.1 A NORMA ISA/IEC 62443-2-1

O capítulo 2-1 da norma ISA/IEC 62443 versa sobre o estabelecimento de um programa de segurança cibernética em ambientes industriais. Muito do exposto neste capítulo tem forte ligação com as normas ISO 27001 e ISO 27002 (International Organization for Standardization – ISO) no sentido de que utiliza uma metodologia de

avaliação e mitigação de riscos baseada em análise e posterior documentação em mapas de risco dedicados.

Este programa de segurança é denominado CSMS (Cyber Security Management System) que é composto de três grandes tópicos, a saber (ANSI/ISA-62443-2-1:2009):

- Análise de Riscos
- Tratamento de Riscos
- Melhoria Contínua

Esta estruturação da norma é mostrada na FIGURA 2, abaixo.

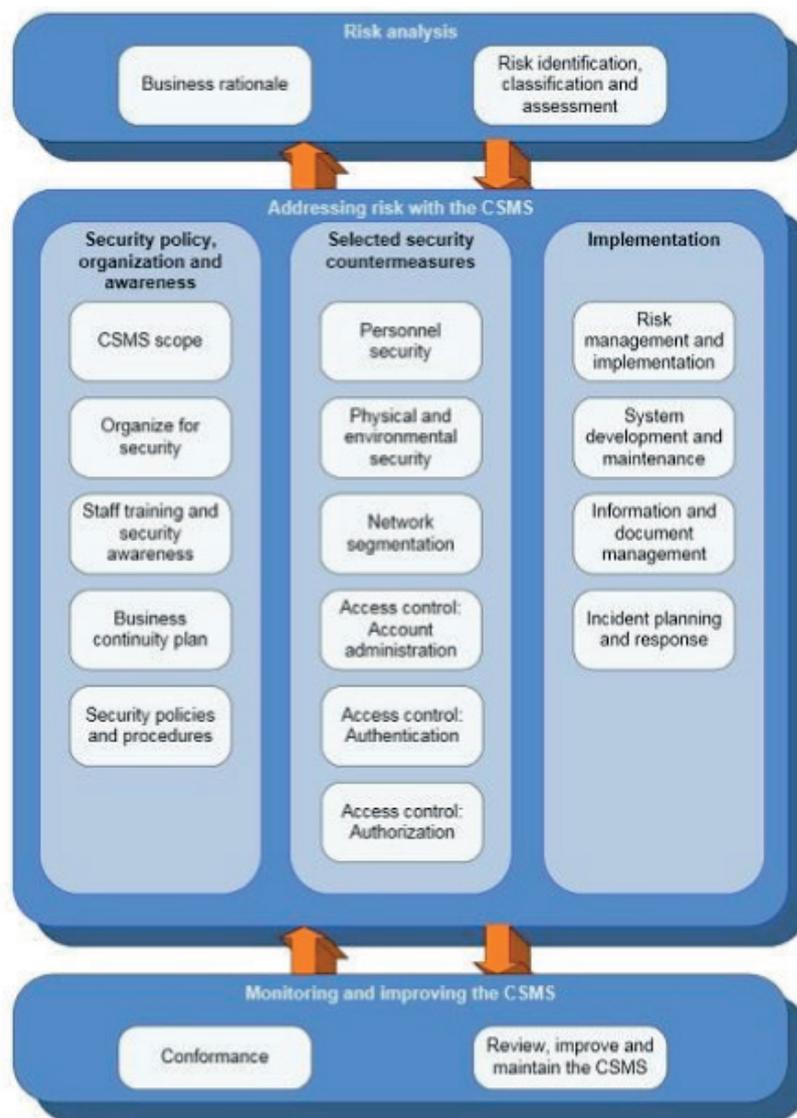


FIGURA 2 – Estruturação da norma ISA/IEC 62443-2-1

No tópico de **Análise de Riscos**, a norma divide o processo em dois tópicos adicionais:

- **Lógica de negócio:** Identificar os objetivos e restrições do negócio quando se aborda a questão de segurança.
- **Identificação, classificação e tratamento dos riscos:** Identificar os riscos ci-

bernéticos, priorizar as vulnerabilidades baseadas em factibilidade e severidade, assim como as consequências de uma falha. A organização deve escolher uma metodologia de análise e aproximação para o problema.

No tópico de **Tratamento de Riscos**, a norma divide o processo em três tópicos adicionais:

- **Política de Segurança, Organização e Conscientização:** Compreende etapas como definição de escopo, equipes, treinamento e conscientização e plano de continuidade que serão agregados a um conjunto de políticas e procedimentos. É importante contemplar neste plano não somente a organização como seus clientes, parceiros e fornecedores.
- **Contramedidas de Segurança:** São o conjunto de medidas para assegurar a presença de barreiras de segurança, sejam físicas ou virtuais.
- **Implementação:** Conjunto de medidas que envolvem a execução e a manutenção das políticas e programas de segurança cibernética.

No tópico de **Melhoria Contínua**, a norma divide o processo em dois tópicos adicionais:

- **Conformidade:** Garantir que o CSMS (Cyber Security Management System) de uma organização é seguido por todos, estabelecendo-se métricas de avaliação de sucesso e medidas corretivas em casos de não-conformidades.
- **Revisão, Manutenção e Atualização/Melhorias:** Definir procedimentos e recursos para o processo de revisão/manutenção/melhoria do CSMS (Cyber Security Management System) de uma organização. Este processo deve contemplar desde a revisão dos riscos aceitáveis até o processo de feedback dos usuários finais, objetos das políticas.

Esta estruturação macro define o programa de segurança cibernética em âmbito industrial sugerido pela norma. Embora muitos aspectos estejam bem definidos no escopo da ISA/IEC 62443-2-1, como podemos observar no tópico de Análise de Riscos, a norma deixa em aberto qual a metodologia que deve ser adotada pela organização para realizar esta análise.

3 | A METODOLOGIA EPRI PARA ANÁLISE DE RISCOS CIBERNÉTICOS

3.1 SOBRE A EPRI

A EPRI (Electric Power Research Institute) é uma organização que realiza pesquisa, desenvolvimento e projetos para benefício do público dos Estados Unidos e internacional. É uma organização não-governamental independente focada em geração e entrega de eletricidade, colaborando com as empresas do setor elétrico para melhorar a qualidade e a confiabilidade assim como diminuir o impacto ambiental do setor (ABOUT EPRI, 2019).

3.2 A MOTIVAÇÃO: A NORMATIVA OSHA 3514

A OSHA (Occupational Safety and Health Administration) foi criada em 1970 para garantir condições seguras dos trabalhadores por meio da publicação de normativas, treinamento, capacitação e assistência (ABOUT OSHA, 2019).

A OSHA 3514 é uma normativa que requer ao fabricante, distribuidor ou importador de materiais químicos fornecer os SDS (Safety Data Sheet) que contenham informações de todos os componentes químicos perigosos das substâncias e quais são as ações ou pré-requisitos para mitigar potenciais efeitos perigosos no manuseio delas. A norma especifica 16 seções com informações desde a identificação do componente até as medidas de primeiros socorros e contenção de danos (HAZARD Communication Standard: Safety Data Sheets, 2019). A FIGURA 3 mostra um exemplo de um SDS (Safety Data Sheet).

2. HAZARDS IDENTIFICATION	
Classified according to the criteria of the Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals (GHS), OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200) and the Canadian Controlled Products Regulations.	
Hazard Classification	
Health Hazards	
Carcinogenicity	Category 1A
Specific Target Organ Toxicity - Repeated Exposure	Category 2 (Lung, Bone)
Label Elements	
Hazard Symbol:	
Signal Word:	Danger
Hazard Statement:	May cause cancer. May cause damage to organs (Lung, Bone) through prolonged or repeated exposure.
Precautionary Statement	
Prevention:	Obtain special instructions before use. Do not handle until all safety precautions have been read and understood. Use personal protective equipment as required. Do not breathe dust/fume.
Response:	If exposed or concerned: get medical advice/attention if you feel unwell.
Storage:	Store locked up.
Disposal:	Dispose of contents/container to an appropriate treatment and disposal facility in accordance with applicable laws and regulations, and product characteristics at time of disposal.
Other hazards which do not result in GHS classification:	Electrical Shock can kill. If welding must be performed in damp locations or with wet clothing, on metal structures or when in cramped positions such as sitting, kneeling or lying, or if there is a high risk of unavoidable or accidental contact with workpiece, use the following equipment: Semiautomatic DC Welder, DC Manual (Stick) Welder, or AC Welder with Reduced Voltage Control. Arc rays can injure eyes and burn skin. Welding arc and sparks can ignite combustibles and flammable materials. Overexposure to welding fumes and gases can be hazardous. Read and understand the manufacturer's instructions, Safety Data Sheets and the precautionary labels before using this product. Refer to Section 8.
Substance(s) formed under the conditions of use:	The welding fume produced from this welding electrode may contain the following constituent(s) and/or their complex metallic oxides as well as solid particles or other constituents from the consumables, base metal, or base metal coating not listed below:

FIGURA 3 – Exemplo de SDS (Safety Data Sheet)

A forma como são analisados e classificados os riscos dos componentes químicos na OSHA 3514 são considerados referência para a indústria no mundo. Por que não usar este formato com outros tipos de risco, como o cibernético?

3.3 A METODOLOGIA EPRI

A EPRI (Electric Power Research Institute) desenvolveu uma metodologia para identificação e mitigação de vulnerabilidades chamada TAM (Technical Assessment Methodology) que consiste em uma verificação com escopo bem definido das vulnerabilidades presentes em um sistema (seja ele um software ou uma rede completa de automação) utilizando o conceito de “Sequência de Exploração” (Exploit Sequence) (GUEDES B.;THOW, M).

Para que uma Sequência de Exploração seja caracterizada, ela necessita da definição de três fatores:

- Um “Objetivo de Exploração” (Exploit Objective)
- Um “Caminho de Ataque” (Attack Pathway): Um caminho físico ou lógico que um atacante pode utilizar para ações diretas ou acesso a dados críticos.
- Um “Mecanismo de Exploração” (Exploit Mechanism): Mecanismo específico que pode ser utilizado a partir de um dado Caminho de Ataque.



FIGURA 4 – Determinando a existência de uma Vulnerabilidade Residual

Uma Sequência de Exploração mapeada resulta no que chamamos de “Vulnerabilidade Residual” (Residual Vulnerability) conforme a FIGURA4. Note que, quaisquer componentes de hardware e software possuem Vulnerabilidades Residuais que devem ser mitigadas. Na classe de vulnerabilidades residuais está incluído o conceito de “Insecure by Design”. Note que, uma Vulnerabilidade Residual não necessariamente é uma falha de software.

Como pode ser observado, esta metodologia analisa sistemas desde o ponto de vista de suas Superfícies de Ataque. Após realizar o mapeamento e verificação das Vulnerabilidades Residuais presentes em um sistema, se tem visibilidade suficiente para aplicar os chamados Métodos de Controle (Security Control Method) que sejam mais

efetivos para mitigar estas Vulnerabilidades Residuais.

3.4 O CONCEITO DE “EXISTEM MEIOS” (MEANS EXIST)

A metodologia da EPRI (Electric Power Research Institute) usa o termo “Existem Meios” (Means Exist) como elemento definidor de um Objetivo de Exploração. Em outras palavras, diz-se que “Existem Meios” se, há um Caminho de Ataque e um Mecanismo de Exploração para se alcançar um Objetivo de Exploração.

De forma contrária, portanto, se não há um Caminho de Ataque e um Mecanismo de Exploração, não há Objetivo de Exploração a ser alcançado.

3.5 MECANISMOS DE CLASSIFICAÇÃO DE VULNERABILIDADES

Como já foi mencionado na seção 3.4, para que um ataque seja possível, “Meios Existem” para que um determinado Objetivo de Exploração seja bem-sucedido, ou seja, uma combinação de Caminho de Ataque com Mecanismos de Exploração.

Baseado nesta premissa, a EPRI (Electric Power Research Institute) classifica a caracterização da superfície de ataque dos sistemas de acordo com as informações mostradas na *TABELA 1*, abaixo.

Vetores de Ataque	Classes de Objetivos de Exploração		
1. Redes Cabeadas 2. Redes Wireless 3. Interfaces Portáteis 4. Acesso Físico 5. Cadeia de Suprimentos	Ação Direta	1. Desabilitar 2. Desabilitar Temporizado 3. Negação de Serviço 4. Malware	
	Manipulação de Dados Críticos	1. Roubo 2. Alteração 3. Em Repouso 4. Em Trânsito	1. Dados de Processo 2. Configuração/Aplicações definidas pelo fabricante 3. Configuração/Aplicações definidas pelo usuário 4. Dados de Segurança 5. Configuração/Aplicações de Segurança definidas pelo fabricante 6. Configuração/Aplicações de Segurança definidas pelo usuário

TABELA 1 - Caracterização das Superfícies de Ataque

Das informações da *TABELA 1*, podemos destacar:

- São definidos 5 Vetores de Ataque que podem gerar diversos Caminhos de Ataque.
- Os Objetivos de Exploração são classificados em Ação Direta (com 4 classes de ações adicionais) e Manipulação de Dados Críticos (com 6 classes de dados adicionais).
- A Manipulação de Dados Críticos ainda possui 4 cenários adicionais possíveis: Roubo, Alteração, Em Repouso e Em Trânsito.

- Desta forma, temos **28 possíveis Objetivos de Exploração** utilizando um dos **5 Vetores de Ataque**, que caracterizam um Caminho de Ataque.

Esta forma de classificação, embora inicialmente pareça grande, é significativamente menor que a árvore de vulnerabilidades utilizada pelo CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) que é um dos métodos mais utilizados para análise e classificação de vulnerabilidades. A FIGURA 5 faz uma comparação entre a quantidade de classificações utilizadas pelo CVE (é uma imagem parcial uma vez que a árvore completa não caberia numa imagem) e as classificações da EPRI (Electric Power Research Institute).

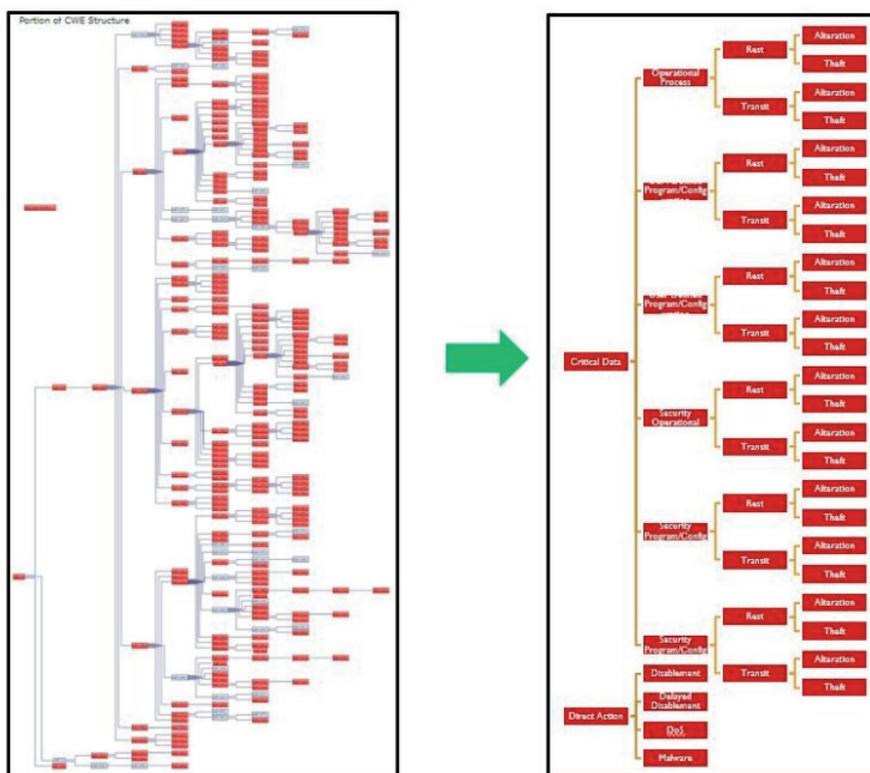


FIGURA 5 – Comparação de árvores de vulnerabilidades: CVE (esquerda) e EPRI (direita)

3.6 RESULTADO: OS CYBER SECURITY DATA SHEET (CSDS)

Os CSDS (Cyber Security Data Sheet) são documentos onde são listadas todas as Vulnerabilidades Residuais detectadas em um sistema e seus Métodos de Controle. A organização dos CSDS (Cyber Security Data Sheet) é composta pelos documentos listados na FIGURA 6, abaixo.

CSDS Organization	
Step 1: Attack Surface Characterization	Work Product
Part 1a: Asset Characteristics	MS-Word document
Part 1b: Target Installation Configuration and Data Flow	
Part 1c: Attack Pathways	MS-Excel spreadsheet
Part 1d: Exploit Mechanisms for Applicable Classes of Exploit Objectives	MS-Excel spreadsheet
Step 2: Engineered Security Control Method Identification, Efficacy, and Allocation	
Part 2a: Engineered Security Control Method Identification and Efficacy	MS-Excel spreadsheet
Part 2b: Engineered Security Control Method Allocation	MS-Excel spreadsheet

FIGURA 6 – Organização dos CSDS (Cyber Security Data Sheet)

A partir desta documentação inicial, a metodologia segue um fluxo de quatro passos como mostrado na FIGURA 7. Os passos 1, 2 e 3 são necessários e o passo 4 é opcional.

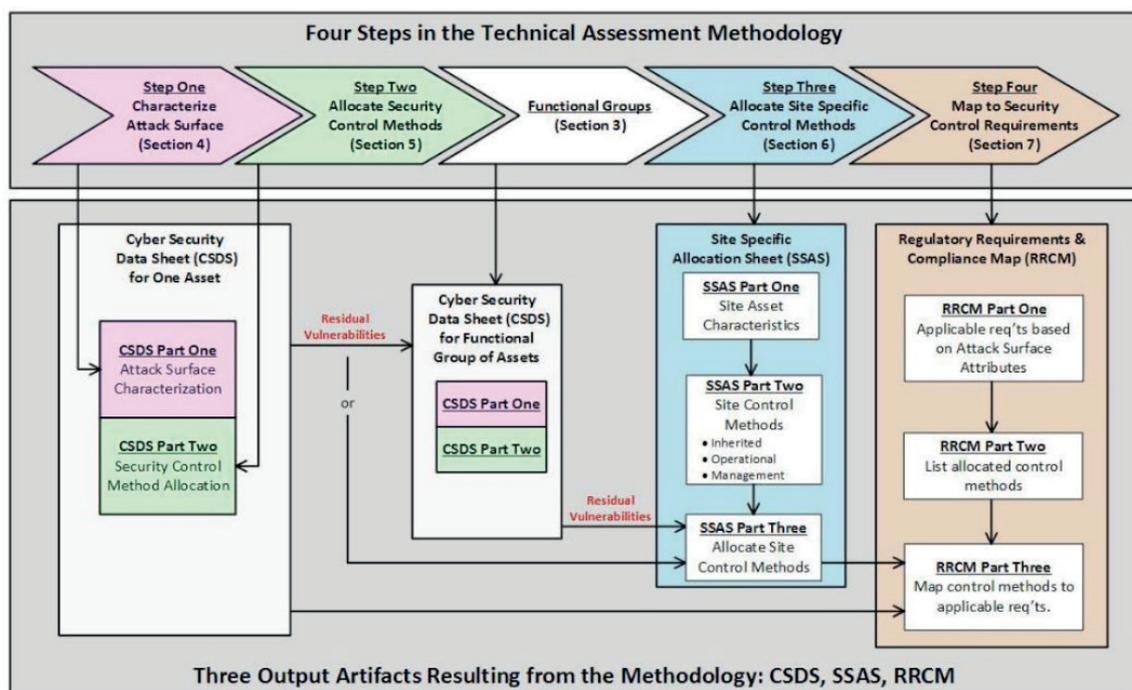


FIGURA 7 – Passos da metodologia TAM (Technical Assessment Methodology)

No passo 3, após a caracterização da superfície de ataque e a alocação de Métodos de Controle para um determinado componente, uma composição de CSDS (Cyber Security Data Sheet) existentes pode ser feita (em termos de Grupos Funcionais) e Métodos de Controle adicionais podem ser aplicados (o chamado Site Specific Allocation Sheet – SSAS) para o conjunto, onde as Vulnerabilidades Residuais de um componente podem ser mitigadas quando interagem com outros componentes dos Grupos Funcionais.

No passo 4, pode-se utilizar os CSDS (Cyber Security Data Sheet) e os SSAS (Site

Specific Allocation Sheet) gerados para mapear requisitos regulatórios ou normas de segurança cibernética nos chamados RRCM (Regulatory Requirements & Compliance Map). Por exemplo, na IEC 62443-2-1, no tópico de Tratamento de Riscos, a norma solicita que sejam definidas e implementadas Contramedidas de Segurança que são, basicamente, as alocações dos Métodos de Controle quando se detecta uma Vulnerabilidade Residual num CSDS (Cyber Security Data Sheet). A FIGURA 8 mostra uma parte da documentação gerada como resultado após a aplicação da metodologia.

CSDS Part 1d: Applicable Technical Vulnerability Classes and Associated Exploit Mechanisms						
Technical Vulnerability Class	Description	Applies?	Applicable Attack	Mechanism to Exploit Vulnerability Class and Notes		
Vulnerability Classes Associated with Direct Action Against the Component						
Component Enable/Disablement-Immediate	Means exist to immediately initiate or halt component operation.	YES	A1, A2	A1.1 - Disconnect power supply. A2.1 - Actions via the faceplate that can take manual control or take the SLC out of service.		
Component Disablement- Delayed	Means exist to degrade support systems or the environment for component operations, eventually resulting in component disablement.	NO		There is no mechanism to trigger a delayed action.		
Denial of Service (DOS)	Means exist to interfere with the normal operation of the component by presenting false demands for component interaction at a component digital port.	NO		Flooding the SLC with HART signals will not interfere with its operation.		
Malware	Means exist to inject or install unauthorized and undetected program content on the component that does not constitute an alteration of existing authorized program content.	NO		Only firmware files can be loaded into memory per the manufacturer.		
Vulnerability Classes Associated with the 6 Critical Data Types						
Operational Process Data	Theft	In Transit	Means exist to access and record operational process data while being transmitted to or from the component, including process variables, control signals, process element state information, alarms, and process data logs. Transmission includes digital data communication and the use of portable storage media.	YES	A1	A1.1 - A HART device "listening" on the loop can record the HART signal.
		At Rest	Means exist to access and record operational process data while stored on the component, including process variables, control signals, process element state information, alarms, and process data logs.	YES	A1	A1.1 - A HART capable device can access the SLC to read and download process data.
	Alteration	In Transit	Means exist to alter operational process data while being transmitted to or from the component, including process variables, control signals, process element state information, alarms, and process data logs. Transmission includes digital data communication and the use of portable storage media.	NO		Operational process data is transmitted via the 4-20 mA signal and is not digital in this data flow.
		At Rest	Means exist to alter operational process data while stored on the component, including process variables, control signals, process element state information, alarms, and process data logs.	NO		The process data cannot be changed on the SLC.

FIGURA 8 - Exemplo de um CSDS

Em síntese, os CSDS (Cyber Security Data Sheet) têm, como característica principal, a escalabilidade. A partir de um ou mais documentos gerados, pode-se criar um novo documento customizado para a infraestrutura de rede de Automação e Controle de uma organização usando os CSDS (Cyber Security Data Sheet) dos componentes individuais como ponto inicial.

Outro ponto importante é que esta documentação pode ser gerada tanto pelas organizações como por fabricantes, onde os fabricantes podem prover as organizações com os CSDS (Cyber Security Data Sheet) para os seus produtos e as organizações, de posse dos mesmos, pode construir seu próprio CSDS (Cyber Security Data Sheet), mapeando os riscos e aplicando os Mecanismos de Controle conforme regras e necessidades de negócio.

4 | CONCLUSÃO

Como parte do estabelecimento de políticas de segurança cibernética, o mapeamento e tratamento de riscos é, certamente, a tarefa mais complexa e, muitas vezes, tediosa para as equipes de segurança cibernética das organizações.

Utilizando a árvore do CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) no momento de analisar as vulnerabilidades de um sistema, ou conjunto de sistemas, os analistas de risco cibernético podem levar intermináveis horas, indo cada vez mais fundo nas classificações do CVE e, em muitas vezes, especialmente para o caso das redes de Automação e Controle, levando a análise de potenciais vulnerabilidades que sequer são aplicáveis a realidade destas redes, num ciclo de análise quase que interminável.

A metodologia desenvolvida pela EPRI (Electric Power Research Institute), utilizando uma aproximação de escopo definido, facilita o trabalho de fabricantes e especialistas das organizações pois, além de simplificar e limitar o escopo de análise, esta análise pode ser granularizada em componentes de hardware/software e ser utilizada como documentação de base em análises mais amplas, a partir da integração entre diversos componentes e equipamentos.

Os CSDS (Cyber Security Data Sheet) provêm visibilidade das Vulnerabilidades Residuais de um sistema às organizações que podem, de maneira muito mais racional e proativa, direcionar seus investimentos em segurança cibernética, priorizando os ativos mais críticos e atendendo a requisitos de negócio. Além disso, por conta de sua granularidade, os CSDS são mais resilientes a mudanças nas superfícies de ataque em decorrência de modernizações, substituições ou adição de ativos uma vez que, para cada uma destas operações, ao invés de se revisitar toda a superfície de ataque, revisita-se apenas os pontos onde houveram modificações.

Da mesma forma, do ponto de vista dos fabricantes, os CSDS (Cyber Security Data Sheet) podem prover informações importantes acerca das características dos seus produtos e possibilitar melhorias, inclusive, no ciclo de desenvolvimento das aplicações em termos de segurança.

Obviamente, a metodologia não existe em si própria mas age como um elemento que auxilia a aplicação correta dos mecanismos de controle presentes em diversas normativas como NIST (National Institute of Standards and Technology), NERC/CIP (North American Reliability Corporation/Critical Infrastructure Protection), ISA/IEC 62443, entre outras possíveis. Desta forma, a metodologia serve como subsídio para planejamento, execução e manutenção de programas de segurança cibernética para o setor.

REFERÊNCIAS

ABOUT EPRI. In: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/about/epri?lang=en-US>>. Acesso em 06 ago. 2019.

ABOUT OSHA. In: OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Disponível em: <<https://www.osha.gov/about.html>>. Acesso em 06 ago. 2019.

CYBER security standards. In: WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Wikimedia, 2019. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber_security_standards>. Acesso em: 06 ago. 2019.

GEDDES, B.; THOW, M. **EPRI Technical Assessment Methodology: Vulnerability Identification and Mitigation** (3002008023)

HAZARD Communication Standard: Safety Data Sheets. In: OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Disponível em: <<https://www.osha.gov/Publications/OSHA3514.html>>. Acesso em 06 ago. 2019

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ANSI/ISA-62443-2-1:2009 – Security for Industrial Automation and Control Systems Part 2-1: Establishing an Industrial and Control Systems Security Program.** 2009.

ANÁLISE DA PERFORMANCE DO MRE E SEUS IMPACTOS COMERCIAIS – PROPOSTA DE REVISÃO DA REGULAÇÃO

Data de aceite: 01/06/2020

João Carlos Mello

Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio, Presidente da Thymos Energia e Coordenador do Comitê de Estudos C5, Mercados e Regulação, no Cigré Brasil

Leonardo Calabró

Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Mauá SP com Pós-Graduação em Operação de Sistemas Hidrotérmicos – UNICAMP, Vice-presidente da Thymos Energia

Vinicius Ragazi David

Graduado em Engenharia Elétrica na UNICAMP, consultor da Thymos Energia

Daniela Souza

graduada Engenheira Eletricista pela Universidade de Pernambuco e Especialista em Sistema de Transmissão por Itajubá, Gerente na Thymos Energia

Luiz Laércio Simões Machado Junior

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ e Superintendente de Comercialização de Energia e Transmissão de FURNAS e coordena o GT Regras de Mercado da ABRAGE

Renato Mendes

Engenheiro Elétrico na UNESP – Bauru e Mestre em Engenharia Elétrica, Planejamento e Otimização de Sistemas Hidrotérmicos na Escola de Eng. de São Carlos – EESC/USP. É sócio na DESTTRA comercializadora de energia

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivos analisar o desempenho do MRE (Mecanismo de Realocação de Energia), com foco no impacto do Fator de Ajuste do MRE (GSF - Generation Scaling Factor) nas relações comerciais das usinas participantes deste Mecanismo, além de propor novas regras de mercado para o MRE, de forma a recuperar a motivação de sua criação, que é o compartilhamento de riscos hidrológicos entre geradores hidrelétricos. A proposta é aferir o “GSF Implícito” no cálculo da garantia física das UHEs do MRE como limite de referência nas regras de mercado. O conceito de um “GSF Implícito” é justo na medida em que a garantia física é concedida pelo poder concedente e se torna o “lastro” para comercialização dos agentes hidrelétricos – assim, percebesse que os riscos da garantia física devem ser definidos juntamente com o seu cálculo.

PALAVRAS-CHAVE: Regras de Mercado, MRE, Risco Hidrológico, Proposta de Regulação.

1 | INTRODUÇÃO

No âmbito do sistema Interligado Nacional (SIN), o benefício da operação coordenada sempre foi considerado significativo, em função da grande participação das hidrelétricas na

matriz brasileira, distribuída em várias bacias hidrográficas e com a operação em cascata. No modelo de competição, implantado desde meados da década de 90, o preço de curto prazo sempre foi atrelado ao Custo Marginal de Operação (CMO), calculado por modelos de otimização do despacho, o qual tem por objetivo preservar os benefícios da operação coordenada do SIN.

Contudo, é importante salientar que o MRE foi planejado em um momento cuja configuração do SIN era distinta da atual. Antes, havia um amplo predomínio das hidrelétricas para atendimento à carga, complementado por um percentual mais reduzido de termelétricas. Nos últimos anos, além do aumento da participação destas, a matriz energética brasileira se diversificou com a inserção das fontes renováveis de “custo marginal zero”, principalmente eólica e biomassa, deslocando a geração hidrelétrica na ordem de despacho dos modelos de otimização energética. Além disso, uma sequência de períodos chuvosos abaixo da média nas principais bacias do SIN acentuou que o MRE sofre não apenas com impactos conjunturais, mas também com fatores estruturais, como a mudança da matriz já comentada. Em condições normais, caso um gerador hidrelétrico não consiga gerar toda sua energia, ele a recebe de outros geradores via MRE, aliviando sua exposição. Entretanto, caso o somatório da geração do MRE seja menor que a Garantia Física total das usinas participantes do Mecanismo, surge um redutor da garantia física, o GSF, o qual é calculado pela divisão entre geração e garantia física do MRE. Diversos fatores exógenos ao chamado risco hidrológico alteraram o equilíbrio do MRE nos últimos anos, e a degradou muito o desempenho do mecanismo, levando os geradores a recorrer a medidas judiciais para “estancar a sangria” nos resultados das empresas.

Importante comentar que a garantia física de qualquer usina hidrelétrica é calculada com riscos implícitos de atendimento à demanda pelos mesmos modelos computacionais utilizados no planejamento e operação do SIN. A proposta deste trabalho, tendo sido elaborado junto com os geradores hidrelétricos do MRE, é calcular um limite de referência nas regras de mercado para os riscos hidrológicos. Sendo assim, a proposta volta aos conceitos primordiais do cálculo da Garantia Física (GF) das UHEs do MRE e define o conceito de um “GSF Implícito” que está incluso na definição da GF. Como desdobramentos da metodologia proposta, espera-se que: (i) ocorra a blindagem dos efeitos “exógenos” de operação e planejamento que causam GSF; (ii) o operador e planejador fariam os seus melhores esforços frente à realidade e evolução do sistema sem causar interferências na performance do MRE; (iii) os geradores hidrelétricos poderão fazer sua gestão de riscos conhecendo os limites da sua garantia física no MRE; (iv) os efeitos da sazonalização deverão estar blindados, de forma que, para efeito do “GSF Implícito” a base seria uma sazonalização “flat”; (v) as diferenças no MCP devido à limitação com o “GSF Implícito” vão para um encargo a ser pago pelo consumo, de forma similar ao definido na regulação da blindagem do GFOM na Resolução ANEEL 764/17.

2 | DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA

O “Mecanismo de Realocação de Energia (MRE)” é um mecanismo criado para compartilhar os riscos financeiros de venda de energia no longo prazo com a mitigação do risco hidrológico. O objetivo do MRE sempre foi garantir que todos os geradores hidrelétricos do sistema recebessem seus níveis de GF, independentemente de seus níveis reais de produção, desde que a geração total do MRE não estivesse abaixo da GF total do Sistema. Sendo que para isso, o MRE transfere (realoca) energia dos geradores que produziram excedentes para aqueles que geraram abaixo da sua GF. Existe a energia secundária no sistema quando toda energia produzida pelos geradores do MRE for superior à soma de seus níveis de GF. Quando toda a energia produzida pelos geradores do MRE for inferior à soma de seus níveis de GF, então a GF de cada gerador é ajustada na CCEE por um fator de redução (GSF). O problema na ocorrência de GSF sempre foi conhecido pelos agentes, o lastro da usina hidrelétrica é reduzido na proporção do GSF, e dependendo dos seus compromissos contratuais pode haver exposição no mercado de curto prazo ao PLD.

O fato é que diversos fatores que não só aqueles considerados no cálculo da GF das usinas hidrelétricas estão afetando bastante o desempenho do MRE nos últimos anos. Existem regulamentações específicas para cálculo da GF, e em nenhuma delas se incorporam os fatores e incertezas que o desempenho do MRE está sofrendo nos últimos anos. A geração hidrelétrica no sistema brasileiro não controla o uso de seus reservatórios, que devem ser otimizados pelo despacho central. A obrigação formal do setor elétrico em garantir o equilíbrio estrutural é a única proteção do investidor prudente e criterioso contra impactos muito significativos na sua receita e no equilíbrio econômico-financeiro da concessão. O GSF está promovendo fortes impactos nas receitas dos geradores sem que suas causas sejam aquelas projetadas – existem outras causas além do efeito conjuntural ocasionado por riscos hidrológicos.

Uma análise particular das causas do GSF de forma muito sintética é apresentada na Figura 1. Notar que, nos últimos anos o problema mudou de rumo e necessita um diagnóstico mais profundo para entender as suas causas.

Numa forma objetiva de valorar o impacto do GSF nos agentes do MRE, a exposição destes agentes pode ser valorada diretamente pelo PLD mensal, de acordo com os montantes de GSF ou energia secundária do referido mês.

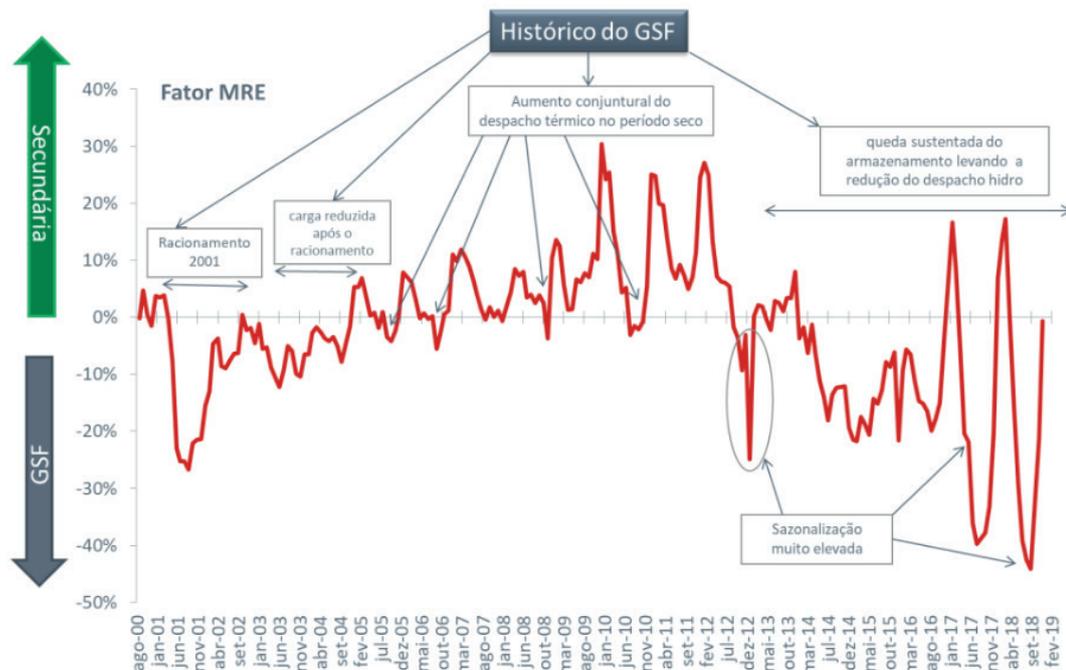


Figura 1– Comportamento Histórico do MRE e GSF – 2000 a 2019

Notar que, a insuficiência de lastro provocada pelo GSF pode provocar duas situações distintas nos geradores do MRE, que depende do volume de vendas em relação a sua GF: (i) ausência de cobertura contratual, quando a GF alocada, após o MRE e com efeito do GSF, é menor que a soma de seus contratos de venda, o que cria uma exposição negativa no mercado de curto prazo (MCP) para o gerador que é valorada ao PLD, ou o gerador pode ainda ter contratos com terceiros para cobrir esta exposição, porém, ainda assim, é uma despesa adicional com potencial relação com o PLD; (ii) redução da perspectiva de resultados com a venda de energia no curto prazo, na qual o gerador pode manter uma margem para negociação no curto prazo - proteção contra o GSF e/ou venda em contratos de menor prazo, o que resulta numa perda de receita valorada ao PLD. Sendo assim, o PLD possui uma grande influencia nos efeitos do GSF nos geradores do MRE. É possível, sem perda de qualidade da análise, não se considerar a exposição real dos geradores com o perfil de contratos, e sim o resultado no MCP sem os contratos, que seria, assim, o valor imposto pelas variações do MRE nos agentes.

Os valores acumulados desde setembro de 2000 até dezembro de 2018 são apresentados abaixo na **Figura 2**. Notar que, no período de setembro de 2000 a dezembro de 2018, apesar de um equilíbrio energético médio no MRE (secundária – GSF ~ -2%), o déficit monetário acumulado em valor histórico é muito alto (~ R\$ 161 bilhões). Focando agora num período mais recente da vida do MRE no mercado - janeiro de 2013 a dezembro de 2018, estas proporções são alarmantes, como ilustrado também na **Figura 2**. O desequilíbrio energético no MRE de 2013 a 2018 é muito mais acentuado (secundária – GSF ~ -12%) e o déficit acumulado monetário acumulado em valor histórico é muito alto também (~ R\$ 140 bilhões), explicando cerca de 87% do total acumulado de

toda a vida do MRE desde 2000.



Figura 2 – Balanço MRE – setembro 2000 a dezembro 2018

O fato é que o desempenho do MRE foi continuamente se deteriorando no período após janeiro de 2013. As explicações para este efeito são muitas, desde a pendência provocada da falta de revisão da GF desde 2014, o que levou o sistema a conviver com um perfil de GF “artificialmente” alto, até mesmo ao aumento expressivo de desvios da operação, que provocaram o “deslocamento do MRE”, e a significativa redução do mercado esperado após 2015.

2.1 O Papel da Sazonalização do MRE

O perfil da sazonalização do MRE é uma arbitragem de alguns geradores hidrelétricos, que podem escolher livremente seu perfil dentro de limites regulatórios dentro do ano. O perfil escolhido pelo proprietário da usina pode ser muito distinto daquele verificado da sua geração. Esta é uma prática comercial adotada desde a criação do MRE. Evidentemente que, o padrão da sazonalização da soma de todo o conjunto de usinas do MRE influencia o desempenho do mecanismo como um todo, pois aquela será a meta do MRE em cada mês do ano. A Resolução Normativa ANEEL 584/2013 disciplinou prazos e condições de sazonalização e modulação das garantias físicas para fins de lastro e do MRE, o que, em suma, define que o padrão do grupo que arbitra influencia o desempenho individual de cada usina no MRE – o chamado “efeito manada”.

Os resultados demonstram que a adoção livre da sazonalização do MRE não é o principal problema do GSF, pois dos valores apontados na **Figura 2** cerca de R\$ 20 Bilhões dos R\$ 161 Bilhões se deve à livre sazonalização comparada com um perfil constante. Entretanto, as práticas mais intensas de 2013 até 2018 (“efeito manada”) contribuem um pouco mais para o problema do GSF - R\$ 16 Bilhões dos R\$ 140 Bilhões do período.

Com o objetivo de evitar uma contaminação na sugestão de ajuste do MRE com uma ferramenta de mercado, a proposta neste trabalho considera que é melhor que os cálculos do impacto em cada agente de geração, para fins de blindagem do MRE e seus desdobramentos na regulação, sejam realizado considerando a hipótese de uma sazonalização “flat”, similar ao que foi adotado nos procedimentos da “repactuação” da Lei nº 13.203/2015.

2.2 O Impacto no MRE dos Efeitos “Exógenos” ao Risco Hidrológico

O certo é que ocorreu nos últimos anos uma série de fatores exógenos ao risco hidrológico no setor elétrico, que necessitam ser qualificados e comprovados, para uma demonstração inequívoca dos seus efeitos no equilíbrio do desempenho do MRE. Estes fatores podem ser divididos em fatores estruturais e operacionais. Dentre os fatores estruturais e operacionais é possível destacar os seguintes:

- a) Fatores Estruturais: atraso de obras de geração e de transmissão prejudicaram a oferta bruta do sistema; falta de aderência entre o planejado (EPE) e o realizado (leilões); falta de sincronia dos leilões de geração e transmissão; os leilões privilegiaram apenas a modicidade tarifária e não levou em conta a segurança energética; aumento da mortalidade dos projetos com reconhecimento tardio do poder concedente; leilões de reserva realizado com fontes alternativas com “custo marginal zero”, que serão sempre priorizadas no despacho; Queda acentuada do consumo a partir de 2015.
- b) Fatores Operacionais: desacoplamento da operação real e planejada; CNPE 03 – modelagem aversão ao risco; consideração de riscos na operação fora dos modelos computacionais com aumento do despacho térmico (GFOM – fora da ordem de mérito); aversão exagerada ao racionamento com extensão do tempo e profundidade do desequilíbrio da oferta & demanda.

Este somatório de efeitos “exógenos” acarretou um aumento expressivo do GSF desde 2013 até 2018, e é certo dizer que, apesar das condições hidrológicas desafiadoras nos últimos anos, seus impactos não foram os únicos no MRE, pois houve uma “mistura” de riscos hidrológicos provocados pela natureza com fatores externos provocados por ações e decisões setoriais.

Um sinal claro do problema recorrente no SIN depois de 2012 é o perfil de armazenamento dos reservatórios do Sudeste (SE), que é o maior do sistema. O esvaziamento acentuado após 2011/2012 levou reservatórios do SE do 2º melhor armazenamento (abril/11) ao pior dos últimos 20 anos (nov./2014). Uma consequência nefasta é que, mesmo com a crise econômica que reduziu em muito o mercado após 2015, os reservatórios não conseguiram se recuperar até hoje. A Figura 3 ilustra este comportamento do armazenamento do reservatório equivalente do Sudeste. Embora a situação da “crise hidrológica” desde 2014 sugira que a origem sejam causas conjunturais, analisando a hidrologia desde 2012 esta conclusão não é tão óbvia. Percebe-se que as estatísticas demonstram um quadro não tão favorável, mas a hidrologia não está dentre as piores do histórico disponível.

Desta forma, é útil notar que fatores “exógenos”, junto com os desafios proporcionados pela hidrologia, são os verdadeiros responsáveis pelo impacto no MRE. É possível até mesmo segregar estes fatores “exógenos” para identificar sua influencia no problema,

no entanto, deve ficar claro que este é apenas um bom exercício de observação, e não deve nunca ser o único caminho para ajustes na regulação, como tem sido tentado. A **Figura 4** ilustra o impacto total de alguns efeitos exógenos selecionados ao total do GSF desde 2013 a 2018. As parcelas correspondem à energia de reserva, GFOM, limites de transmissão das estruturantes e a sazonalização livre já comentado.



Figura 3 – Comportamento do Armazenamento do Reservatório Equivalente do Sudeste

O impacto provocado por estes fatores exógenos é de 50% do total. Além destes assinalados na **Figura 4**, outros fatores exógenos estão consistentemente prejudicando o desempenho do MRE nos últimos anos. Dentre vários outros fatores, aquele de maior impacto, sem dúvida, foi uma redução drástica do mercado a partir de 2015. A acentuada queda na atividade econômica do país em 2015 esteve refletida na queda de consumo de energia. A redução observada na carga anual de 2016, dentre as perspectivas do PMO do ONS desde 2013, foi cerca de 8 GW.médio, ou seja, é um impacto significativo. Uma série de causas que não só a hidrologia do SIN está provocando efeitos negativos no desempenho do MRE desde 2012. Desbalanços estruturais provocaram o uso maciço do volume de energia armazenada nos reservatórios, o que levou o sistema a uma situação de fragilidade operativa sem precedentes até hoje.

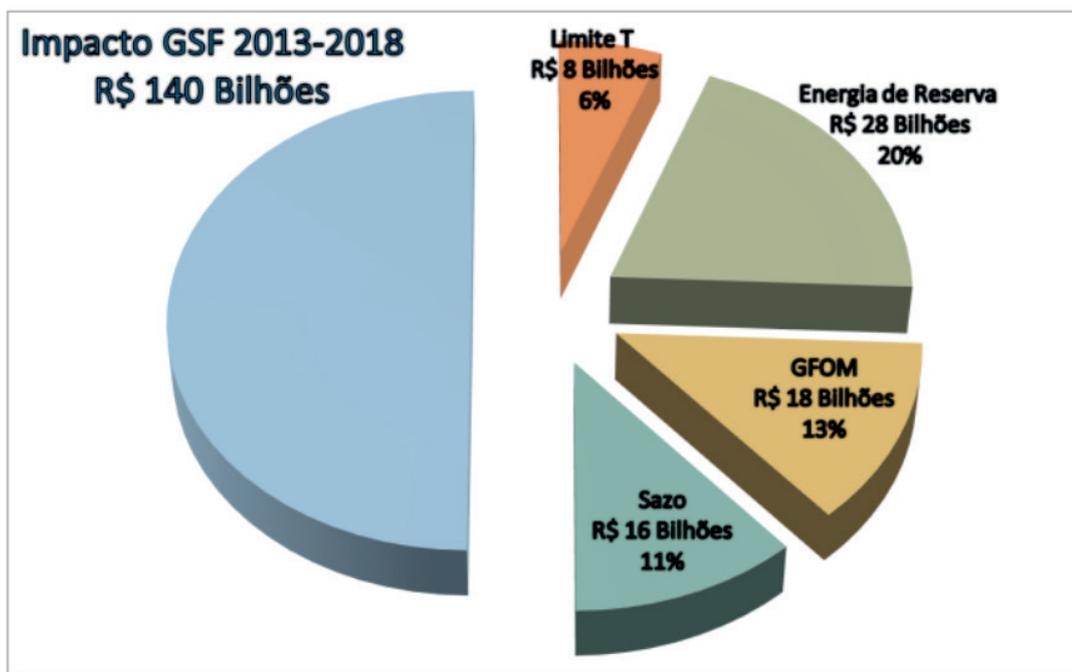


Figura 4 – Alguns Fatores Exógenos no MRE – 2013-2018

No momento, a única saída para a operação tem sido reduzir o despacho das hidrelétricas, o que afeta significativamente o MRE. A proposta aqui apresentada entende que é necessário limitar o impacto negativo do MRE (GSF) apenas ao “risco hidrológico” que sempre foi assumido pelos agentes – a despesa com todos os efeitos no despacho das hidrelétricas não deve ser paga apenas pelos geradores hidrelétricos. O certo é que o levantamento de todos os efeitos “exógenos” exigiria uma série de hipóteses que seriam discutidas exaustivamente e sem conclusão definitiva. A solução ora proposta busca se afastar disto e propõe algo simples, como a definição de um risco “implícito” junto com a garantia física desde sua origem de cálculo.

3 | METODOLOGIA PROPOSTA

O lastro comercial garantido da GF repercute esta condição de operação otimizada ao investidor como o volume “seguro” de comercialização de sua energia no longo prazo. O objetivo é impedir que não existisse “vendas acima das suas capacidades seguras de entrega” e o comprador não compre energia que não existe. Pela mesma razão, o oposto também ocorre, dado que a simulação nos modelos considera que, nos piores cenários de hidrologia, o lastro será reduzido pela redução da capacidade de produção em função da segurança do SIN até o momento que será efetuado o corte de carga (“acionamento”), que para o SIN é uma operação mais econômica – “base custo do déficit”. A redução da GF (GSF do MRE) na “vida real” está muito associada com a qualidade do atendimento e por consequência da segurança do SIN. Um ponto básico neste momento é a seguinte questão: até onde se considerou no cálculo da GF esta redução sem que fosse feito o

corde de carga? O fato é que a operação utiliza usualmente o critério de risco “zero” por questões políticas e a GF das usinas são planejadas até um limite (risco < 5% ou CMO = CME), ou seja, até onde é “responsabilidade” do investidor da hidrelétrica por esta falta de sincronia de critérios? Ou seja, a proposta neste trabalho se afasta da prática de tentar “blindar” o MRE em tempo real, e parte para observar os conceitos que são considerados no cálculo da GF na busca dos riscos envolvidos na definição do lastro.

3.1 Conceitos no Cálculo da GF

No cálculo da GF da última revisão ordinária, válida a partir de 2018, várias previsões importantes relativas aos anos subsequentes foram importantes para o resultado encontrado [1]. Dentre as definições pertinentes, na metodologia também está implícita a consideração de um perfil de risco em relação ao volume de energia calculado como GF das usinas na revisão. A estatística adotada para cálculo da GF das usinas hidrelétricas é estabelecida a partir de princípios de cálculo definidos pelo poder concedente – MME. Neste caso, pela regulamentação se adota um risco de déficit máximo de 5%, ou CMO=CME, para cálculo da carga crítica, na sequência é obtida a Oferta Hidráulica (EH), e após se utiliza a energia firme com a pior sequência de vazões do histórico, para alocar a GF individualmente. No cálculo da GF [1] é considerado, para cada série sintética e em cada mês da simulação no período de análise, o bloco das hidrelétricas simuladas (BH), que suporta o cálculo da oferta hidráulica (EH). A dispersão do BH possui correlação plena com a geração das usinas do MRE, e pode ser calculada na simulação da GF como se fosse uma “proxy” do comportamento do bloco do MRE. Sendo assim, é possível calcular o comportamento do MRE, conforme regras de mercado, dentro da simulação da GF. O Fator MRE é calculado então como:

$$\text{Fator MRE } (i,j,k) = BH (i,j,k) / EH \quad (1)$$

onde i é o mês, j é o ano e k é a série sintética e se Fator MRE $(i,j,k) > 0$ é secundária e Fator MRE $(i,j,k) < 0$ é GSF

Uma avaliação do risco “GSF Implícito” no cálculo da GF pode ser obtida com a verificação nas 2000 simulações do perfil de despacho hidrelétrico (BH) comparado com a oferta hidráulica (EH), que reflete o “Bloco do MRE”. Este “GSF Implícito”, com base na dispersão do Fator MRE, pode ser mensurado nas 2000 simulações com as séries sintéticas com os mesmos parâmetros oficiais. Algumas estatísticas do MRE podem ser obtidas da simulação da GF: (i) MRE Plurianual – é a média anual do Fator MRE de todos 5 anos utilizados para cálculo da GF; (ii) MRE Anual - é a média anual do Fator MRE encontrado em cada ano; (iii) MRE Mensal – é o Fator MRE médio em cada mês considerando todos 5 anos utilizados para cálculo da GF. Estas variáveis são probabilísticas em relação às 2000 séries sintéticas e é possível obter estatísticas com os resultados encontrados.

Cabe esclarecer que, não é necessário incluir os casos de GSF durante os racionamentos preventivos encontrados nas simulações, pois nesta situação em tempo real os contratos dos geradores são ajustados, o que reduz a exposição dos geradores hidrelétricos.

3.2 Princípios da Proposta

Os riscos hidrológicos do investidor em geração hidrelétrica devem estar compreendidos nas premissas e resultados do cálculo da GF em qualquer momento do tempo. Este valor do risco hidrológico admissível seria denominado “GSF Implícito”. As estatísticas do GSF dentro do cálculo da GF que podem servir de referência para a regulação – a variação do Fator MRE pode ser calculada na modelagem da GF. Estes valores podem ser atualizados periodicamente durante as revisões ordinárias da GF. Na definição de GF para novas usinas se calcula também a estatística do bloco hidráulico e o padrão de GSF associado. Os procedimentos periódicos de cálculo do “GSF Implícito”, no âmbito da regulação e sua formulação nas regras de mercado, devem ser considerados para efeito do MRE como um todo, ou seja, para ACR e ACL. Cabe ressaltar que o “GSF Implícito” deve ser levantado com a sazonalização constante (“flat”) dentro da simulação da GF.

O fato é no ACR existem soluções já adotadas como a repactuação e contratação das cotas com certo nível de risco hidrológico. Um debate importante é que os princípios da repactuação no ACR poderão ser revistos com esta nova proposta (adesão voluntária) e a margem de risco hidrológico adotado nas cotas também pode ser revista. Para efeito da energia hidrelétrica, comercializada no ACL, ou remanescente do ACR, tudo seria concentrado numa gestão de riscos do próprio gerador dado os limites do GSF implícito na GF. O deslocamento hidráulico do GFOM já reconhecido hoje (Resolução ANEEL 764/17) continuaria a ser compensado da mesma forma, já que o GFOM não é nem ao menos capturado nas estatísticas do cálculo da GF, além de já possuir tratamento próprio. Deve se considerar também que, com o aperfeiçoamento dos modelos computacionais que suportam o despacho do ONS, os eventos de GFOM tendem a se reduzir. A adoção do “GSF Implícito” é um princípio que estabelece limites de risco e são aceitos pelos geradores hidrelétricos. Para aqueles que pretendem comercializar volumes maiores até 100% da GF não existe impedimento, e está claro que existe uma proteção do mercado que foi superada por sua conta e risco.

3.3 Riscos na GF - Última Revisão Ordinária

A última revisão ordinária se encontra descrita [2] e para efeito de cálculo do “GSF Implícito” se adotou o chamado “Caso de Referência” e o deck de simulação é obtido junto com a EPE. Um ponto importante para o levantamento de riscos do MRE é valor

obtido para o Bloco Hidráulico (EH) que foi de 54.581,6 MW.médios para o “Caso de Referência”. A estatística da dispersão do MRE é apresentada na **Tabela 1**. Com foco apenas nos valores do Fator MRE < 0%, que indicaria na simulação da GF os casos com GSF, é possível obter a **Figura 5**. A estatística do GSF fica mais clara e as diferenças conforme o indicador plurianual, anual e mensal também fica evidente. Cabe ressaltar que a realidade do GSF tem sido bem maior que estas estatísticas “implícitas” no cálculo da nova GF de 2018. A proposta é que se reconheçam estes limites advindos do cálculo da GF, e se adote nas regras de mercado o risco à que estão submetidos os geradores hidrelétricos do MRE.

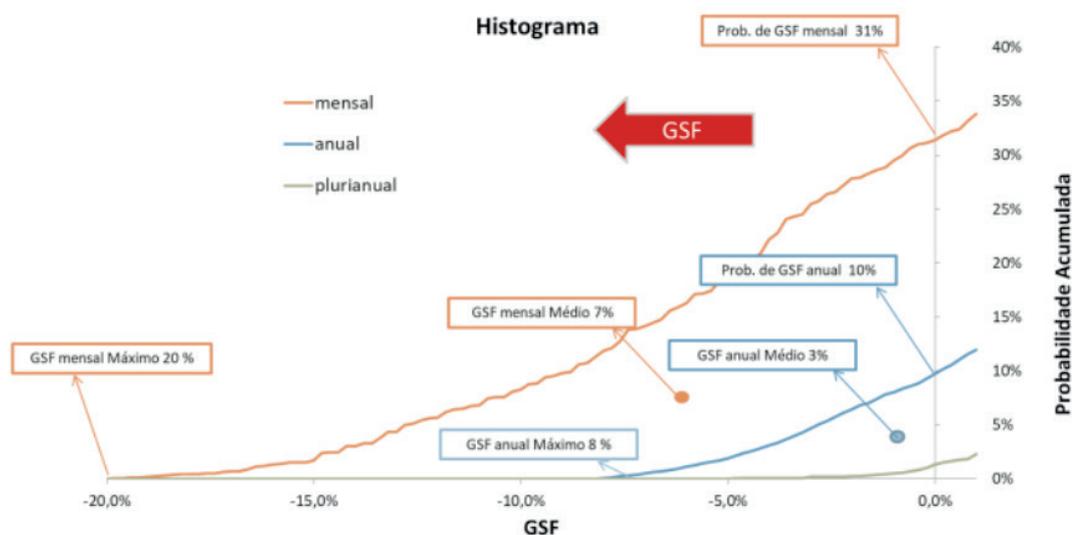


Figura 5 – Distribuição de Probabilidade Fator MRE - Revisão Ordinária 2017

Indicador	plurianual	anual	mensal
Média - Fator MRE	9,1%	9,1%	9,2%
Prob. GSF	1,3%	9,7%	31,4%
Média GSF	-1,1%	-3,1%	-7,1%
GSF Mínimo	-4,9%	-8,0%	-19,8%
GSF Percentil (1%)	-0,3%	-6,0%	-16,4%
GSF Percentil (5%)	-	-2,80%	-12,6%
Média > 0 (secundária)	9,3%	10,4%	16,6%
Secundária Máxima	16,7%	18,9%	32,6%

Tabela 1 - Estatísticas do MRE - Revisão Ordinária 2017.

3.4 Riscos na GF – 1998

Um pergunta importante acerca da proposta ora apresentada é “isso sempre foi assim?”. Ou seja, o risco do GSF sempre foi um problema conhecido? A realidade do fator MRE (ou do próprio GSF) foi bem maior que os valores razoáveis de GSF “implícitos” no cálculo da nova GF de 2018, conforme **Figura 5**. Para qualquer que seja o indicador

escolhido para o GSF observado versus os valores implícitos, as diferenças são muito grandes. De forma a testar a hipótese dos limites do GSF buscou-se simular a energia assegurada de 1998 (similar ao conceito da atual da GF) com o deck disponível daquela época. O fato é que a composição da matriz daquela época tinha uma preponderância da participação hidrelétrica na matriz (91%), e ainda assim esta composição era formada, em grande parte, por usinas com reservatório, bem diferente do padrão atual. Desta forma, o MRE foi criado em 1997/98 dentro do projeto RE-SEB num contexto em que a matriz de energia elétrica era predominantemente hidrelétrica e os reservatórios ainda representavam uma parcela significativa de armazenamento. No contexto atual, o MRE das hidrelétricas convive com uma matriz completamente diferente – as hidrelétricas representam 65% e as térmicas cerca de 20% – além disso, o deslocamento do MRE é provocado pela presença de outras fontes de “custo marginal zero”, como as eólicas.

Na simulação com o deck de 1998 o bloco hidráulico encontrado foi de 35.195 MW.médios [3], utilizando o critério de convergência de atender o risco de déficit de 5%, que era o critério da época. A **Tabela 2** apresenta as estatísticas do MRE obtida da simulação de cálculo da GF (conforme critérios de época) utilizando a configuração de 1998, que foi utilizada no cálculo inicial das energias asseguradas. O fato é que, refazendo o cálculo da GF de 1998 (início do mercado), os números encontrados para a estatística do MRE são bem diferentes. Notar que a probabilidade da ocorrência de GSF mensal na simulação é 1,4%, que é bem menor que 31,4% obtida na simulação da GF atual, conforme **Tabela 1**. Os números de GSF como um todo são bem menores, portanto a variável GSF nas regras de mercado do MRE era uma possibilidade mais longínqua para os geradores do MRE.

Na **Figura 6** é apresentada uma visão gráfica das estatísticas. É fácil perceber que a distribuição de probabilidade do Fator MRE em termos de risco é muito mais modesta que aquela obtida com a revisão da GF de 2017, como na **Figura 6**.

Indicador	plurianual	anual	mensal
Média - Fator MRE	15,2%	15,2%	15,6%
Prob. GSF	-	0,3%	1,4%
Média GSF	-	-1,1%	-3,2%
GSF Mínimo	-	-2,7%	-10,0%
GSF Percentil (1%)	-	-	-1,6%
GSF Percentil (5%)	-	-	-
Média > 0 (secundária)	15,2%	15,2%	15,6%
Secundária Máxima	19,3%	19,3%	30,0%

Tabela 2 – Estatísticas do MRE – 1998

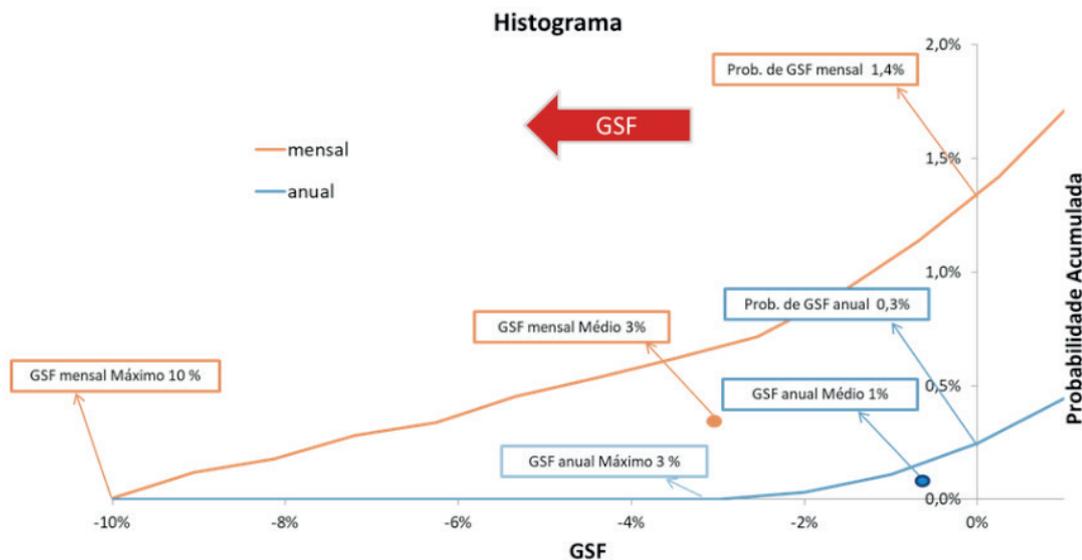


Figura 6 – Distribuição de Probabilidade Fator MRE - 1998

O padrão das estatísticas do MRE obtidas no cálculo da GF e os seus riscos “implícitos” depende da qualidade da participação da dupla hidrotérmica na matriz. Ou seja, o padrão de participação das hidrelétricas e térmicas na matriz, bem como a qualidade destes insumos, tais como a capacidade de armazenamento e o perfil de CVU das térmicas, é fundamental para a vida do MRE. A participação das demais fontes também é importante, na medida em que a carga líquida que a dupla hidrotérmica enxerga na operação se modifica bastante. Em síntese, quando se compara as estatísticas do MRE obtidas nas simulações da GF de 1998 e 2017 (ver Tabela 1 e Tabela 2) se percebe que o problema atual do GSF é uma componente estrutural. Os riscos implícitos na definição da GF mudaram, e se os riscos eram mínimos no começo do MRE, hoje já são impactantes. Por isso, o mito de que o GSF sempre foi um problema dos geradores deve ser visto com muita cautela, pois os riscos do GSF e do MRE mudaram muito. O poder concedente deve reconhecer que o “mundo do MRE mudou” e os riscos vieram para ficar, portanto os limites de risco na GF são justos e também são necessários.

4 | ALOCAÇÃO DE CUSTOS

Quando se define um “limite de responsabilidade” para os geradores do MRE, ao mesmo tempo vai existir parte dos custos que eram destes geradores, e deverão ser cobertos por outros agentes. A proposta ora apresentada entende que este rateio seja entre os consumidores, dado que este é o único racional mais concreto, uma vez que o limite de riscos para os geradores do MRE trará mais liquidez ao mercado, com vantagens para o consumidor.

4.1 Sugestão de Alocação de Custos

Partindo do princípio que o mercado consumidor seria o responsável por cobrir

os custos adicionais com a limitação de riscos dos geradores do MRE, algumas regras possíveis seriam as seguintes:

- a) As diferenças no MCP devido à limitação com o “GSF Implícito” iriam para um encargo a ser pago pelo consumo, de forma similar ao definido na blindagem do GFOM na Resolução ANEEL 764/17. Este encargo seria denominado “encargo MRE” e seria cobrado ex-post, dependendo do período de conciliação que será selecionado – mensal ou anual. Os geradores, num primeiro momento, são responsáveis pela diferença e serão cobertos posteriormente pelo encargo MRE. A regra de conciliação não será objeto de definição neste trabalho, porém poderá ser até mesmo anual para dar previsibilidade ao lado consumo das despesas.
- b) É reconhecido que existe uma correlação com o aumento do GSF e a entrada dos leilões de reserva com usinas de “custo marginal zero”, que são despachadas prioritariamente. A conta CONER que faz o balanço entre pagamentos aos geradores e a liquidação destes no MCP, poderia ser utilizada como forma de amenizar o impacto do novo “encargo MRE”. Por exemplo, todo o saldo positivo da CONER no MCP faria a compensação deste novo “encargo MRE”, com o objetivo de reduzir o impacto ao consumo, que pagaria a diferença desta compensação com um valor fixo do EER (encargo reserva) para cobrir os geradores com energia de reserva.

Apesar conceito da limitação com o “GSF Implícito” valer para todos os geradores do MRE, alguns possuem gestão de riscos própria com o ACR, quais sejam Itaipu, cotas de garantia física e as usinas que repactuaram.

Estas usinas com gestão de riscos direta com o ACR poderão ser objeto de análise própria de melhorias, no entanto, se sugere aqui que o benefício da blindagem com o “GSF Implícito” seja limitado ao que se chama aqui de “GF Livre”, que é a GF do MRE que não possui nenhuma gestão de riscos. A Tabela 3 apresenta o balanço da chamada GF Livre em 2018.

O benefício do “GSF Implícito” estaria disponível então para 42% da GF hidrelétrica do MRE no mercado.

Esta GF Livre está disponível para vendas futuras no ACL e no ACR como existente, nas futuras recontrações.

Balanço Atual da GF Revisada 2018			
GF Flat - Total		54.927	100%
Itaipu		7.773	14%
GF sem flexibilidade contratual	cotas originais	8.515	16%
	cotas leiloadas	3.188	6%
	PROINFA	84	0,2%
	GF Repactuada	12.275	22%
GF livre contratos (*)		23.175	42%

Tabela 3 – GF Livre do MRE - 2018

Nota: (*) inclui autoprodutores

4.2 Benefícios “GSF Implícito”

Evidentemente, a adoção de limites de risco para os geradores do MRE não traz apenas custo para os demais agentes. O principal benefício é o aumento da liquidez do mercado comprador da GF Livre. O benefício anual médio de maior liquidez com a adoção de um “GSF Implícito”, por exemplo, de um valor limite mensal de 8%, considerando a GF livre para contratações desde 2014 teria sido o descrito na Tabela 4.

Ano	2014	2015	2016	2017	2018
Benefício GSF (MW.médios)	833	1682	1407	3420	2575
Benefício/ GF Livre	7%	13%	10%	21%	17%

Tabela 4 – Aumento de Liquidez com a GF Livre do MRE – 2014-18

Este benefício representa uma energia adicional que poderia estar no mercado sem risco de GSF para venda e não estaria concorrendo na compra dos geradores para cobrir a exposição do MRE – o aumento da liquidez trará certamente uma redução de preços no mercado. Esta energia no mercado (ACL + ACR Existente) estaria mais competitiva do que na situação atual com riscos do GSF para os geradores. Esta maior liquidez da energia com GF livre estaria competindo hoje por contratos “a termo” no médio e longo prazo. Os leilões do ACR (A-1 e A-2) com contratos de duração média concorrem com os contratos de médio prazo no ACL (1 a 2 anos à frente) com duração de 1 até 5 anos ou mesmo para durações maiores. Apesar de que uma parcela da energia livre vai buscar os preços de curto prazo muito influenciados pelo PLD, onde a liquidez faz pouca diferença. O fato é que haveria um choque de oferta no mercado com cerca de 50% de oferta (2.000 a 2.500 MW.médios) a mais no mercado para recontração com a liberação do GSF implícito (8% mensal neste exemplo). A melhor estimativa é de cerca de 10 a 20% de redução de preço no médio prazo (partir de 2020), o que na curva de preços do mercado representaria algo como: (i) 2020 a 2023 uma redução de R\$ 15 a 30 / MWh para preços atuais de R\$ 240 a 160 /MWh; (ii) após 2023 uma redução em torno de R\$ 15 / MWh para preços atuais de 160 /MWh.

4.3 Novo Encargo MRE - Sugestões

A cobertura do pagamento do encargo MRE é um debate interessante dado que a GF Livre, que estaria tendo seu risco limitado pelo “GSF Implícito”, atende primordialmente o ACL e apenas uma parcela ao ACR. A mudança no conceito com a introdução do novo encargo é fundamental – os geradores respondem pelo GSF até um limite designado pelo poder concedente e regulador. O pagamento pelo ACR e ACL deve ser na parcela

livre como um todo na sua proporção removendo as energias inteiramente dedicadas ao ACR – Itaipu, cotas, repactuação. O “caso base” deve ser a cobertura anual do MCP além do “GSF Implícito” com conciliação a posteriori no ano posterior pelo lado consumo beneficiado (parte ACR e todo o ACL), sendo que a liquidação da conta CONER faria a compensação no MCP mensalmente e os geradores da energia de reserva seriam integralmente cobertos pelo EER fixo pagos proporcionalmente pelos beneficiados. A energia secundária entraria de forma positiva da conta do GSF Implícito e faria parte da conciliação.

4.3.1 Encargo MRE – Back Test 2012-18

Com o objetivo de avaliar a proposta é possível realizar um Back Test de 2012 a 2018, adotando na simulação que toda a regulação vigente já estivesse disponível. Considerando que, a energia hidrelétrica é um insumo para ambos os mercados ACR e ACL, é possível repartir os ônus e bônus entre estes ambientes. Seriam descontadas as energias com alocação de riscos própria no ACR e a GF livre seria então apropriada proporcionalmente a sua participação na GF total hidrelétrica – em 2018 seria em 42% do mercado (ver **Tabela 3**). Evidentemente esta é uma forma de rateio sugerida, e não busca refletir de forma alguma a alocação de energia hidrelétrica em cada mercado. Os mercados são irrigados por diversos tipos de energia que se tornam competitivas para seus compradores, na medida do interesse e momento de cada ambiente. O balanço custo & benefício na visão do consumidor deve levar em consideração todas as rubricas, incluindo a redução de preço no ACL e ACR existente, mesmo que esta seja apenas uma estimativa de ganho indireto para os consumidores. Neste sentido separou-se a seguir as principais rubricas:

a) Despesa do Consumidor

- Despesa - GSF Implícito – para cobrir o encargo MRE aparece uma nova despesa para o consumidor para fins de sustentabilidade do MRE;
- Despesa – GFOM- a cobertura para o despacho fora da ordem de mérito já é adotada pela regulação e não foi considerada no novo encargo MRE e representa uma despesa para o consumidor final. Foi adotada no balanço aqui realizado, pois já é um custo existente para o consumidor relativo ao MRE.
- Despesa - Pagamento EER fixo – na alternativa adotada se utiliza a estratégia de utilizar um EER fixo e os resultados do MCP da CONER para abater o encargo MRE, portanto esta também seria uma despesa do consumidor.

b) Benefício do Consumidor

- Benefício - Abatimento Secundária – na proposta ABRAGE toda a secundária dos geradores com GF Livre seria então colocada a disposição para abatimento do novo encargo MRE;
- Benefício - MCP Reserva – na alternativa ora analisada os resultados do MCP da

CONER seriam utilizado para abater o encargo MRE na proporção do uso da GF Livre pelo mercado ACL e ACR;

- Benefício - Redução do Preço de Contratos – um dos maiores benefícios para o consumidor será o aumento da liquidez da energia hidrelétrica no mercado com a adoção da metodologia do “GSF Implícito”. Este ganho foi estimado como algo em torno de 10% da expectativa de preços no ACL e ACR Existente – visão médio prazo 2 anos à frente, como destacado na **Tabela 5**.

As **Figura 7** e **Figura 8** apresentam estes balanços por rubrica e o consolidado de despesas e benefícios. O balanço Custo & Benefício para o consumidor simulação com o Back Test 2012-18 demonstra que no todo existe um resultado positivo (R\$ 4,34 Bilhões) para o consumidor, mesmo que em alguns anos exista um balanço negativo – o desafio é a conciliação ao longo dos anos.

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Redução (R\$/MWh)	R\$ 10	R\$ 15	R\$ 30	R\$ 25	R\$ 20	R\$ 25	R\$ 25
GF Livre (% do Total GF Hidro)	37%	38%	40%	42%	44%	47%	42%

Tabela 5 – Benefícios Liquidez e Abrangência do Mercado

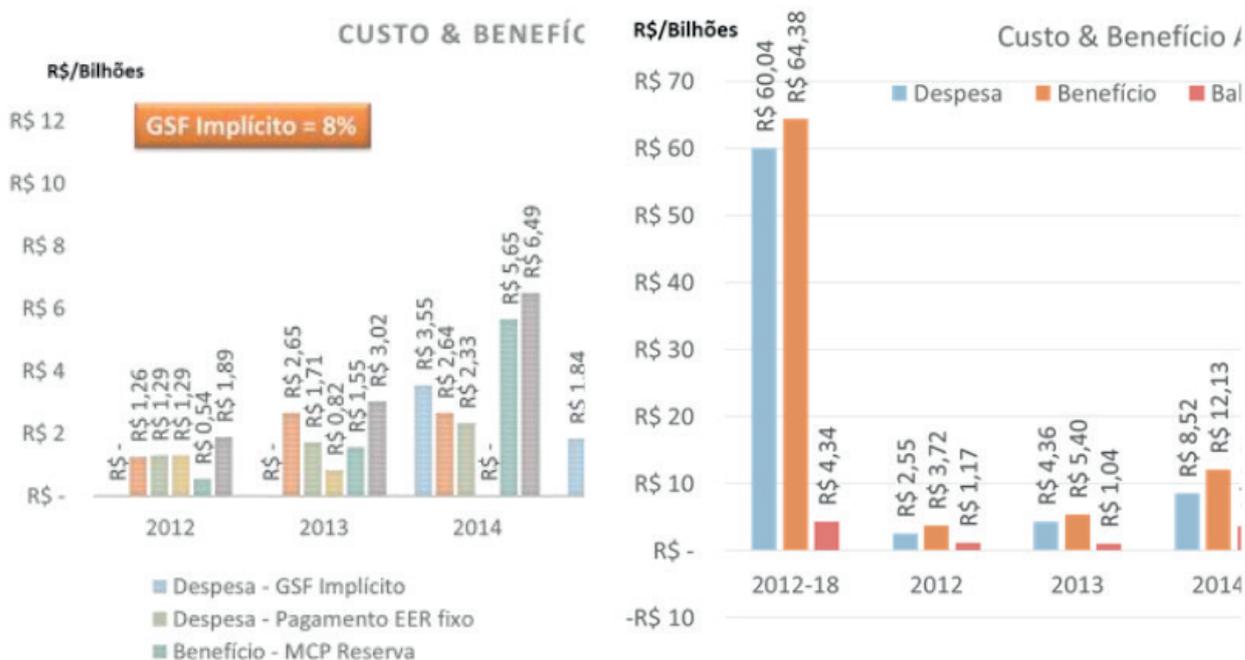


Figura 7 – Custo & Benefício por Rubrica 2012-18 Figura 8 – Custo & Benefício Consolidado 2012-18

5 | DESAFIOS DA PROPOSTA

5.1 Sincronia com o ACR

5.1.1 Itaipu e Cotas de Garantia Física

A gestão de riscos do MRE com o ACR é oferecida de forma direta no caso Itaipu e das cotas de garantia física, já que as distribuidoras assumem todo o risco hidrológico. Inclusive, esta tem sido uma oneração enorme nas tarifas dos consumidores cativos. As compradoras, que são as distribuidoras, são de certa forma “proprietárias” desta geração do MRE sem nenhuma gestão dos riscos do MRE. Aplicando o conceito do limite de “GSF Implícito”, que é aplicável a todo o bloco do MRE, nesta energia que é absorvida no portfólio de contratos das distribuidoras, seria possível reduzir a energia de Itaipu e cotas no portfólio de contratos das distribuidoras até o limite adotado do “GSF Implícito”. O pagamento das distribuidoras cotistas não se alteraria, uma vez que a base de pagamento é pela capacidade contratada. Estas seriam então oneradas no MCP da CCEE apenas quando o limite adotado do “GSF Implícito” fosse ultrapassado. Apenas para fins de exercício, a **Tabela 6** apresenta o volume de desconstratação nas distribuidoras com diferentes limites de “GSF Implícito”. Com isto se alcançaria a mitigação do risco hidrológico nas tarifas e resolveria o problema atual de sobrecontratação das distribuidoras.

	GF	Nível de proteção atual	Limites "GSF Implícito"				
			5%	8%	10%	12%	15%
Itaipu	7.773	0%	389	622	777	933	1166
Cotas	11.703	5%	-	351	585	819	1170
Desconstratação Total (MW.médios)			389	973	1362	1752	2336

Tabela 6 – Potencial Desconstratação de Itaipu e Cotas

5.1.2 Repactuação

A solução da repactuação do risco hidrológico foi uma solução encontrada em 2015/2016 fundamentalmente no ACR. A solução bem inventiva buscou oferecer um “seguro” contra o GSF, tendo como contrapartida uma redução de preço nos CCEARs com base no prêmio escolhido pelo gerador. No levantamento junto à biblioteca da ANEEL houve a adesão de 97 geradores à repactuação do risco hidrológico e a estatística de adesão aos produtos é apresentada na **Figura 9**. Notar que, a maioria absoluta dos geradores optou pelo produto SP100, que era um produto com risco bem mais baixo, cessão da secundária e prêmio mais caro. Outro ponto a ser observado na **Figura 9** que 97% dos produtos foram do tipo SP, o que significa que a maioria absoluta aceitou ceder a secundária em troca de um prêmio mais módico e a aversão ao risco em relação ao MRE é enorme. Na proposta ora oferecida, o produto “GSF Implícito” no fundo é um produto SP com prêmio “zero”. É possível inclusive aqueles geradores que já repactuaram no ACR uma adesão facultativa a esta nova modalidade e teriam seus prêmios ajustados. Cabe ressaltar que, aquele conjunto de geradores que repactuaram produtos com níveis de risco menores que o “GSF Implícito” estaria na busca de uma proteção ainda maior.

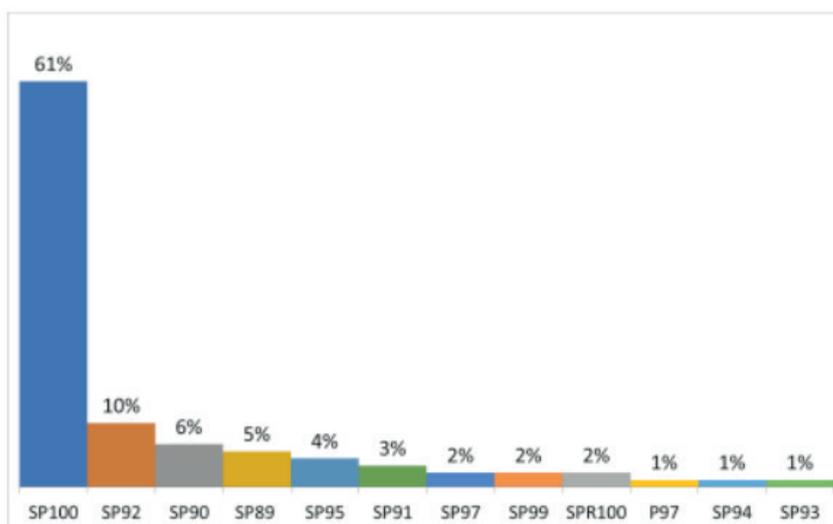


Figura 9 – Adesão aos Produtos da Repactuação – Estatística

5.1.3 Mudanças na Regulamentação

Serão necessárias mudanças na regulamentação para adoção da proposta deste trabalho. O ajuste na legislação setorial para incluir este benefício novo demandará ajustes em leis, decretos e resoluções da ANEEL. Notar que, a proposta é um processo de visão futura para o problema do GSF e não deve ser confundido com a tentativa legítima de “ajustar” o problema do passado que está num projeto de lei tramitando no legislativo.

6 | CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho é estruturada de forma a corrigir um risco “não controlável” para os geradores do MRE e busca nos fundamentos do cálculo da GF o indicador de risco do MRE que é o “GSF Implícito”. A proposta busca ser simples e direta sem cálculos complicados para “blindar” todos os efeitos exógenos, o que certamente criaria outra série de contestações. O benefício do GSF Implícito é dedicado para a GF das hidrelétricas sem relação direta com o ACR (Itaipu, cotas e repactuadas), no entanto o conceito pode ser estendido para toda a GF, o que levaria a uma revisão do portfólio de contratos das distribuidoras provenientes destas fontes, e reduziria o chamado “risco hidrológico” nas tarifas. O MRE é um tema estrutural, dentro do cenário que se desenha para o futuro e sua solução deve ser da mesma forma, estrutural. Na realidade, a opção pela expansão sem hidrelétricas fará com que a expansão seja muito calcada nas fontes renováveis (custo marginal “zero”) e termelétricas para segurança eletro-energética o que afetará muito o desempenho do MRE. O debate amplo sobre o futuro do MRE não tem solução imediata e a proposta busca uma solução simples e rápida, e é uma transição para o futuro das hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

MME/EPE - “Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas – UHEs Despachadas Centralizadamente no Sistema Interligado Nacional – SIN”, 25 de abril de 2017.

MME/EPE - “Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas” - EPE-DEE-RE-016/2017-r2 de 26 de abril de 2017.

Resolução ANEEL nº 232, de 27 de junho de 1999.

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA INCLUSÃO EDUCACIONAL DE PESSOAS COM DEFICIÊNCIA MOTORA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 03/04/2020

Felipe Massayuki Quiotoqui

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP

RIBEIRÃO PRETO – SÃO PAULO

<http://lattes.cnpq.br/5628637778769607>

Italo Rodrigues da Silva

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP

RIBEIRÃO PRETO – SÃO PAULO

<http://lattes.cnpq.br/0638870824361314>

RESUMO: O presente estudo foi destinado a promover maior inclusão de pessoas com alguma deficiência motora no ambiente educacional, visando proporcionar maior autonomia ao estudante.

Para a confecção do protótipo da aplicação foi feito o uso da linguagem de programação orientada a objetos Java junto a IDE (ambiente de desenvolvimento integrado) Android Studio, gerando uma aplicação mobile. Este tipo de software atende uma maior gama de usuários. Perante ao desenvolvimento do projeto notou-se maior agilidade na criação de algoritmos devido a implementação de blocos pré-programados. Sendo assim, o emprego da aplicação em uma

sala de aula de maneira correta, aponta para um futuro promissor com maior inclusão.

PALAVRAS-CHAVE: Inclusão, Educação, Android, Aplicativo, Acessibilidade, Portabilidade e Ciência da Computação.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR EDUCATIONAL INCLUSION OF PEOPLE WITH MOTOR DISABILITIES

ABSTRACT: The present study was aimed at promoting greater inclusion of people with some motor impairment in the educational environment, in order to provide greater autonomy to the student.

For the preparation of the prototype of the application was made the use of the programming language oriented to Java objects with the IDE (Integrated Development Environment) Android Studio, generating a mobile application. This type of software serves a wider range of users. In view of the development of the project, there was greater agility in the creation of algorithms due to the implementation of pre-programmed blocks. Thus, the use of the application in a classroom correctly points to a promising future with greater inclusion.

KEYWORDS: Education, Android, App, Accessibility, Portability and Computer Science.

1 | INTRODUÇÃO

A inclusão no meio educacional tem sua visão aproximar qualquer cidadão no meio, independente da circunstância que tenha, assim, um centro de ensino necessita muitas vezes de adaptações consistentes, para que seja efetivo para os estudantes. Visto que o valor para o conhecimento não deve ter uma barreira por causa da infraestrutura das instituições.

Nesse cenário é possível visualizar uma crescente expansão tanto na sua diversidade, ideologias e a inclusão em si, pois a educação de todos os jovens deve ser regularizada e colocada em pauta de forma geral.

Um exemplo, mas que muitos lugares não existem, formas praticas para pessoas com deficiências motoras utilizarem as mesmas maquinas tecnológicas que manipulamos no dia a dia, seja um computador, celular, tablet. Diante desses contratemplos, é evidente que precisamos pensar em uma inclusão, a importância das adaptações para que o ponto principal seja garantir o ensino para todos. Portanto, procurou-se trazer o maior número de informações com o propósito de responder a seguinte problemática. Qual a importância da inclusão em um ambiente educacional?

O enfoque dado a inserção fica diretamente ligado à importância de uma formação acadêmica, pois diante do mercado de trabalho com todas as ramificações existentes e seu alto grau de seletividade, busca-se a maioria das vezes pessoas com um “certo” conhecimento e capacitações elevadas para exercer tal cargo. Para tanto que a formação inicial necessita de ser extremamente valorosa, e ter todos os incentivos necessários para uma boa didática assim, formando grandes especialistas no futuro.

Para o desenvolvimento do atual trabalho utilizamos para as coletas de informações provenientes de artigos científicos, bem como a próprio texto da Declaração de Salamanca (1994) elaborada pelas Nações Unidas juntamente com a UNESCO. Esta declaração que estabelece diretrizes para a inclusão igualitária de pessoas portadoras de algum tipo de deficiência no ambiente educacional.

O estudo está sendo dividido em forma de capítulos, onde o primeiro será posto o nosso objetivo, que visa mostrar o quanto o desenvolvimento da inclusão é relevante o cenário em questão. Por sua segunda parte inicializaremos os matérias e métodos que aplicaremos ao decorrer da pesquisa além das suas descrições e importâncias. A terceira parte ficara com o estudo do caso visando os históricos da abordagem do assunto das instituições e o quanto de envolvimento caracterizado por elas. Assim a quarta parte ficara por conta dos resultados coletados e uma avaliação do nível de satisfação dos afetados.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como principal objetivo promover a inclusão de pessoas portadoras de deficiência física no meio educacional, com enfoque no curso de Ciência da Computação, por meio de um software desenvolvido para plataforma mobile, facilitando assim a aprendizagem do aluno, além de possibilitar uma maior portabilidade para o uso do equipamento.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Android

Com o passar dos anos e o surgimento de diversas novas tecnologias, como os dispositivos móveis, a demanda por um novo sistema operacional que atendesse estes novos tipos de aparelho tornou iminente.

O sistema operacional denominado Android surgiu no início do ano de 2003, um sistema operacional de código aberto baseado no kernel Linux, com uma interface de usuário de funcionamento na base da manipulação direta.

Este sistema foi desenvolvido por Andy Rubin, Rich Miner, Nick Sears e Chris White. Os três juntos formaram uma empresa denominada Android Inc. com sede em Palo Alto, Califórnia. A empresa tinha como principal ideia o desenvolvimento de um sistema que fosse de fácil compreensão para os desenvolvedores e que também fosse gratuito para a população. A companhia Android Inc. foi comprada pela Google em meados do ano de 2005, deste modo, toda nova atualização e os recursos implementados fica a cargo da Google.

A estrutura padrão do sistema Android contém como principais serviços: Activity Manager, que controla tudo o que se refere ao ciclo de vida e as activities (telas) do aplicativo; Provedores de conteúdo permite que haja a troca de informações entre aplicativos; Gerenciador de recursos fornece acesso a recursos incorporados não codificados; Gerenciador de notificações permite a exibição de alertas para os usuários provenientes de aplicações e por fim Sistema de visualização, conjunto de visualizações usado para criação de interfaces com o usuário da aplicação.

Atualmente o android é o sistema operacional mais utilizado no mundo inteiro, ficando à frente de até mesmo do popular Windows da Microsoft gigante no ramo desktop.



Figura 1 – Gráfico do uso de sistemas operacionais

Fonte: https://brasil.elpais.com/brasil/2017/04/04/tecnologia/1491296467_396232.html

2.2 Java

O Java é uma linguagem desenvolvida no ano de 1995 pela empresa Sun Microsystems, de acordo com a Oracle Corporation é uma ferramenta rápida, confiável e segura. É classificada como baseada em classe, além de ser considerada fortemente tipada.

Um ponto de faz o Java ser diferente das demais linguagens modernas compiladas é fato que ao invés de ser compilada para uma linguagem nativa o Java é compilado no formato de bytecodes, estes que podem ser interpretados pela Java Virtual Machine (JVM) nas mais diversas plataformas.

Dentro os vários pontos fortes contidos na linguagem podemos destacar algumas ferramentas e características, como: suporte a orientação a objetos, portabilidade, segurança, serviço de coletor de lixo, carga dinâmica de código dentro outras mais.

O Java se encontra consolidado no mercado, podemos ver explicitamente na figura abaixo a qual demonstras as linguagens de programação perante ao índice TIOBE, um índice cujo principal objetivo é medir a tecnologia com maior impacto no mercado de tecnologia da informação. Além disso a linguagem oferece uma série de ferramentas e uma rica documentação.

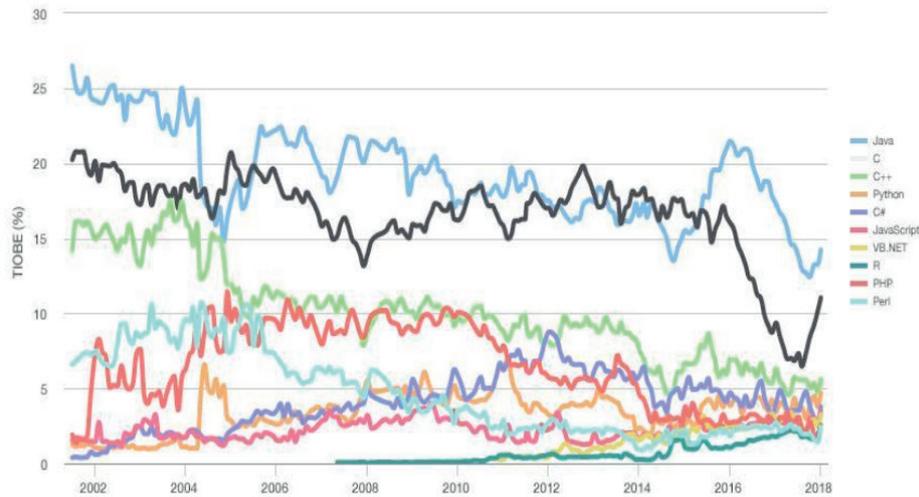


Figura 2 – Gráfico Índice TIOBE
 Fonte: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>

2.3 Android Studio

De acordo com a Google Inc. (2012) a ferramenta Android Studio é uma IDE baseada no IntelliJ IDEA voltada para o desenvolvimento de aplicações Android. Foi lançado pela empresa Google Inc. em meados do ano de 2015, trazendo versões para Windows, Linux e MacOS. É distribuído gratuitamente sob a Licença Apache 2.0.

O Android Studio é descrito pelo no site da Google Inc. (2012) como uma ferramenta que oferece aos desenvolvedores uma série de recursos para o aumento de produtividade, algumas que podemos citar são: emulador rápido e com diversos recursos, possibilidade de desenvolver para todos os dispositivos com sistema android, integração com GitHub, dentre outros.

No que se diz respeito à organização estrutural de um projeto no Android Studio temos os projetos divididos em um ou mais módulos, estes que podem ser classificados como: módulos de aplicativo Android, módulos de biblioteca e módulos do Google App Engine.

3 | DESENVOLVIMENTO

No decorrer deste capítulo descreveremos as funcionalidades implementadas por nossa aplicação, bem como, seus respectivos códigos fonte e telas.

3.1 Home

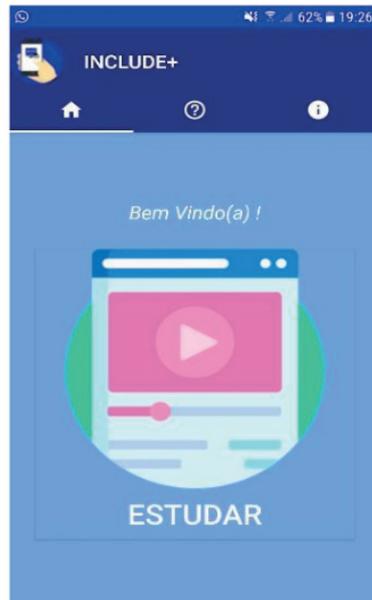


Figura 3 – Tela Inicial da Aplicação

Fonte: Os autores

A figura acima apresenta a tela inicial do projeto, ela é composta basicamente dos seguintes itens: botões (buttons), caixas de texto (TextView), dentro de um TabLayout para que possa ser feita a navegação horizontal do display.

3.2 Sobre



Figura 4 – Tela Sobre

Fonte: Os Autores

O item de menu “sobre” contém um componente fragmente e dentro dele o item denominado CardView onde é apresentado as informações sobre aqueles envolvidos no projeto, sejam autores ou orientador.

3.3 Ajuda

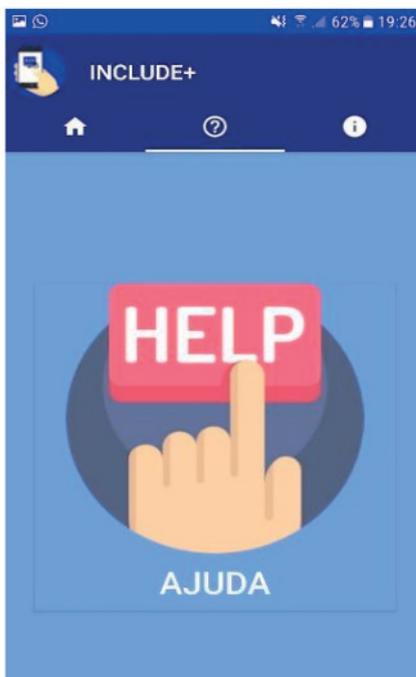


Figura 5 – Tela que permite acesso as instruções de uso

Fonte: Os autores

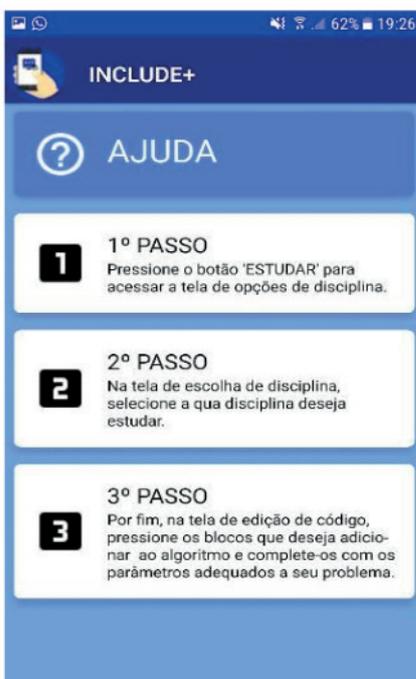


Figura 6 – Código fonte frmHome

Fonte: Os autores.

O botão de ajuda localizado na segunda aba da tela inicial da aplicação quando

pressionado redireciona o usuário a uma nova tela onde o mesmo encontra 03 (três) dicas/instruções de como utilizar a ferramenta de maneira correta e efetiva.

3.4 Disciplina

Para a tela de escolha de disciplina o botão “Estudar” é de suma importância, pois quando acionados a tela de seleção de disciplina é apresentada ao usuário. Nesta tela temos as disciplinas que estão disponíveis para estudo. Ao selecionar alguma, o mesmo é redirecionado a uma tela chamada “editor”, onde será possível o estudo da disciplina selecionada previamente. Logo abaixo temos o layout do “frmDisciplina”.

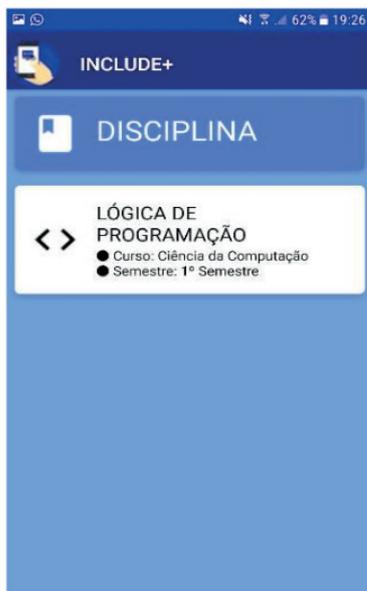


Figura 7 – Layout Tela Disciplina

Fonte: Os autores.

3.5 Editor



Figura 8 – Layout Tela Editor

Fonte: Os autores.

O batizado “editor” é uma espécie de “core” do projeto, ele nada mais é que o ambiente onde o usuário estudará a disciplina de seu interesse. Nele é apresentado ao utilizador uma serie de comando pré-programados que necessitam apenas da substituição de alguns parâmetros pelo usuário de acordo com aquilo que o mesmo deseja desenvolver.

Os itens presentes nesta “lista” ao serem pressionados não colocados num campo de texto (TextView) na ordem escolhida, até formarem um algoritmo pretendido pelo aluno.

Além dos comandos pré-definidos, encontramos também 03 (três) botões, o primeiro deles é o “Salvar”, que ao ser pressionado seleciona todo o conteúdo do TextView que contém os códigos e salva em um arquivo de extensão tipo txt, na raiz do dispositivo móvel onde se encontra instalado a aplicação.

O segundo botão é o de copiar que como o próprio nome já diz, move o conteúdo encontrado no TextView para a área de transferência para que possa ser colado em outro local, como por exemplo o bloco de notas no próprio smartphone.

O último botão desta tela é o “Limpar”, que apaga todo o conteúdo do TextView deixando-o como foi iniciado ao ser selecionada a disciplina.

4 | RESULTADOS

Perante ao desenvolvimento da aplicação e utilização da mesma até o momento podemos constatar que há uma melhora considerável na criação de algoritmos devido ao emprego de alguns blocos pré-programados dentro da aplicação.

Com isso supõem-se que se utilizada de maneira correta em sala de aula o software proporcionará ao aluno maior independência e praticidade para que possa acompanhar as aulas do curso de ciência da computação.

5 | CONCLUSÃO

Neste presente trabalho, o estudo proporcionado ilustrou de forma prática, como o auxílio da tecnologia mediante a um software feito para um grupo específico conseguiu ocasionar melhora tanto individual quanto em grupo em um cenário de ensino. Sendo que por uma segunda vertente mostrou dados de forma explícita, que a carência por meio dessas inclusões é pequena e o grau de conhecimento no meio não é tratado com relevância.

Não conseguimos proporcionar uma experiência total para alguém portador da necessidade, por causa da complexidade do processo. No entanto fizemos alguns testes de simulações onde analisamos um crescente desenvolvimento para maior agilidade no meio da escrita pelo auxílio do programa e também apresentando um conhecimento novo no qual foram postas as sintaxes de linguagens de programação.

A importância do assunto, permitiu no andamento do projeto tanto descobertas no meio da sociedade e algumas tecnologias tratadas como excluídas no cenário atual. Vimos que pode ser concluído e que ajudaria muitas pessoas para seu desenvolvimento pessoal e profissional, dando oportunidades viáveis para utilizar recursos necessários para a carreira.

Enfim, o desdobramento alcançado foi necessário alguns conhecimentos não só da área de tecnologia e tivemos por meio de uma organização interna a utilização de software que a própria engenharia de software nos proporciona.

Estamos dando um grande passo para um caminho deste projeto e assim será feita continuidade sendo evoluções, reformulações e atualizações para ampliar o raio de propagação da informação para as pessoas.

REFERÊNCIAS

Android já é o sistema operacional mais usado do mundo. 2017. Disponível em <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/04/04/tecnologia/1491296467_396232.html>. Acesso em: 03 abr. 2019.

Declaração de Salamanca. 1994. Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/seesp/arquivos/pdf/salamanca.pdf>>. Acesso em 29 mar. 2019.

DEVELOPERS. **Conheça o Android Studio.** Disponível em <<https://developer.android.com/studio/intro?hl=pt-br>>. Acesso em 18 mar. 2019.

LACERDA, Cristina Feitosa. et. al. **Políticas públicas para acesso de pessoas com deficiência ao ensino superior brasileiro: uma análise de indicadores educacionais.** 2015. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/ensaio/v23n89/1809-4465-ensaio-23-89-0984.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

LEITE, Lúcia Pereira; VIOLANTE, Rômulo Rodrigues. **A empregabilidade das pessoas com deficiência: uma análise da inclusão social no mercado de trabalho do município de Bauru, SP.** 2011. Disponível em <<http://www.periodicos.usp.br/cpst/article/view/25717/27450>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

MORAES, Natan; NICOLAI, Bruno Bernardeli; OLIVEIRA, Daniel Moraes; SILVA, Willian Luis. **Google Android: A plataforma, seus componentes e suas versões.** 2012. Disponível em <<http://www.williamluis.com.br/wp-content/uploads/2013/10/TCC-Google-Android-Final.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2019.

ORACLE. **Linguagem de Programação Java.** Disponível em <<https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/guides/language/index.html>>. Acesso em: 03 abr. 2019.

ORACLE. **O que é a tecnologia Java e por que eu preciso dela?** Disponível em <https://www.java.com/en/download/faq/whatis_java.xml>. Acesso em: 03 abr. 2019.

TIOBE Programming Community Index. Disponível em <<https://www.tiobe.com/tiobe-index/>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DE CÂNCER DE MAMA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 04/03/2020

Gustavo da Silva Maciel

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),
Departamento de Computação
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/7302897367901637>

Wagner Kenhiti Nakamura Júnior

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),
Departamento de Computação
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/2309825403628611>

Luiz Francisco Granville Gonçalves

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),
Departamento de Computação
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/2683855357914347>

Leonardo Plaster Silva

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),
Departamento de Computação
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/6197098601365748>

Simone Silva Frutuoso de Souza

Universidade do Estado de Mato Grosso
(UNEMAT), Departamento de Matemática
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/1722951514394531>

Fábio Roberto Chavarette

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Departamento de Matemática
Ilha Solteira, São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/5723359885365339>

Fernando Parra dos Anjos Lima

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),
Departamento de Computação
Tangará da Serra, Mato Grosso
<http://lattes.cnpq.br/7511905330795162>

RESUMO: Este capítulo apresenta uma aplicação dos sistemas imunológicos artificiais para o diagnóstico de amostras de câncer de mama. Utiliza-se o Algoritmo de Seleção Negativa para discriminar as amostras, obtendo uma classificação em casos benignos ou malignos. A principal aplicação para esta metodologia é auxiliar profissionais no processo de diagnóstico de câncer de mama, proporcionando rapidez na tomada de decisão, eficiência no planejamento de tratamentos, confiabilidade e a assistência necessária para salvar vidas. Para avaliar este método, utilizou-se a base de dados Wisconsin Breast Cancer Diagnosis (WBCD). Trata-se de uma base de dados real de câncer de mama. Os resultados obtidos pelo método, quando comparado com a

literatura especializada mostram precisão, robustez e eficiência no processo de diagnóstico de câncer de mama.

PALAVRAS-CHAVE: Diagnóstico, Câncer de mama, Sistemas Imunológicos Artificiais, Algoritmo de Seleção Negativa, WBCD.

ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS APPLIED IN THE DIAGNOSIS OF THE BREAST CANCER SAMPLES

ABSTRACT: This chapter uses an artificial immune system applied for diagnosing breast cancer samples. The Negative Selection Algorithm was used to discriminate the samples, attaining a classification for benign or malignant cases. The main application of the methodology is to assist professionals in the breast cancer diagnostic process, thereby providing decision-making agility, efficient treatment planning, reliability and the necessary intervention to save lives. To evaluate this method, the Wisconsin Breast Cancer Diagnosis database (WBCD) was used. This is an actual breast cancer database. The results obtained using the method, when compared with the specialized literature, show accuracy, robustness and efficiency in the breast cancer diagnostic process.

KEYWORDS: Diagnosis, Breast Cancer, Artificial Immune System, Negative Selection Algorithm, WBCD.

1 | INTRODUÇÃO

Há algumas décadas observa-se um crescimento significativo na intensidade de novos casos de câncer de mama em todo o mundo, este fato se deve devido ao aumento da expectativa de vida da população (WANG; GEORGE LEE, 2002). O câncer é uma doença crônica que atinge milhões de pessoas em todo o mundo. Este tipo de câncer ocorre principalmente em países de médio e baixo desenvolvimento, onde a prevalência de câncer se torna um problema de saúde pública, e exige maior vigilância, condutas de prevenção, políticas de conscientização, e tratamentos efetivos.

Segundo um levantamento realizado pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA) no ano de 2012, evidenciou-se que o câncer de mama é o segundo mais frequente no mundo e o mais comum entre as mulheres, respondendo por 22% dos casos novos a cada ano. No ano de 2012 também foram diagnosticados 52.680 novos casos de câncer de mama no Brasil (INCA, 2012).

A taxa de mortalidade por câncer de mama é muito elevada no mundo todo, muito provavelmente porque a doença é diagnosticada em estágios avançados. No Brasil no ano de 2012 foram registradas 12.852 mortes por câncer de mama, sendo 147 homens e 12.705 mulheres (INCA, 2012). Em outra estatística apresentada pela Organização Mundial de Saúde (OMS) observa-se que aproximadamente 39% das mulheres que lutam

contra o câncer de mama, vão a óbito (OMS, 2012).

Dados estes fatos, torna-se necessário adotar políticas de conscientização, prevenção e, principalmente, buscar realizar o diagnóstico do câncer de mama em estágio inicial. O diagnóstico correto em um estado prematuro da doença pode proporcionar decisões rápidas e auxiliar no planejamento de ações e, evidentemente, a eficiência no tratamento. Para um diagnóstico correto é necessária muita experiência por parte do profissional e, principalmente, que a classificação do estadiamento clínico do tumor (estágio do câncer) esteja correta.

Em Manikantan et al., (2009) destaca-se que os tradicionais sistemas de classificação utilizados pelos médicos são complexos, e normalmente de difícil utilização, oferecendo limitações aos patologistas, não permitindo rapidez na tomada de decisão. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas integrados que tenham capacidade de trabalhar com técnicas de processamento e análise de dados, e que, combinados com a experiência dos profissionais, proporcione a assistência necessária para realizar o diagnóstico e planejar o tratamento.

Neste sentido, a aplicação de sistemas inteligentes (SI) se torna uma possível solução para o problema de diagnóstico. Os métodos inteligentes são capazes de extrair informações e conhecimento de problemas complexos, e são de fácil aplicação. Na literatura encontram-se trabalhos relacionados onde se apresentam métodos inteligentes para auxiliar profissionais a realizar o diagnóstico de doenças, em especial profissionais com pouca experiência. Desta forma na sequência são apresentados alguns trabalhos sobre diagnóstico de câncer de mama que se destacam na literatura.

Na referência (PENA-REYES; SIPPER, 1999), os autores apresentam um método para diagnóstico de amostras de câncer utilizando a lógica fuzzy e o algoritmo genético. Em Wang; George Lee, (2002) foi usada uma rede ANFIS (JUNG,1993) para realizar o diagnóstico de câncer de mama, os resultados foram considerados satisfatórios (96,30% de acerto). No artigo (MEESAD; YEN, 2003) é proposto um sistema híbrido que utiliza uma rede neural em conjunto com um sistema especialista fuzzy. O sistema teve um bom desempenho quando aplicado na base de dados Wisconsin (WBCD, 2012).

Em Zhao; Davis, (2011) os autores apresentam um método baseado no algoritmo de seleção clonal, onde é adicionada uma modificação através da utilização de um modelo de base radial do tipo mínimos quadráticos parciais para auxiliar no processo de geração de anticorpos. Os autores fizeram uma série de testes e obtiveram bons resultados, com um índice de acerto de 99,58%. Porém, dependendo do valor dado à largura da base radial o processo de classificação se comporta de maneira desordenada.

Os sistemas imunológicos artificiais (SIA) foram inspirados nos sistemas imunológicos biológicos e visam reproduzir, computacionalmente, suas principais características, propriedades e habilidades (DASGUPTA, 1998). Os SIA são ferramentas adequadas para realizar diagnósticos, devido a habilidades de detecção de mudanças de comportamento

em padrões (CASTRO; TIMMIS, 2002).

Neste capítulo, apresenta-se um método para diagnóstico de câncer de mama baseado nos sistemas imunológicos artificiais. A partir das amostras cancerígenas, aplica-se o algoritmo de seleção negativa (ASN) para diferenciar as amostras entre próprias (benignos) e não-próprias (onde há evidência de malignidade). As amostras classificadas como próprias não representam riscos, isto é, não são prejudiciais ao organismo. As classificadas como não-próprias são amostras que necessitam de uma maior atenção, pois apresentam evidências de malignidade. Para avaliar o desempenho do método, foram realizados testes com uma base de dados real bem explorada na literatura. Sendo a base de dados Wisconsin Breast Cancer Diagnosis (WBCD, 2012).

2 | BASE DE DADOS WISCONSIN BREAST CANCER DIAGNOSIS (WBCD)

A base de dados WBCD foi criada pelo Dr. William H. Wolberg. Trata-se de um médico dos hospitais da Universidade de Wisconsin Madison, na cidade de Wisconsin nos Estados Unidos (WBCD, 2012). O Dr. Wolberg, em seu ofício, entre os anos de 1989 e 1991, recebeu diversos casos de tumores na mama para serem analisados. Nas análises realizadas, os tumores foram diagnosticados em benignos e malignos. Com referência a estas informações, foi montada uma base de dados com 9 instâncias representando as características do tumor e, evidentemente, a classificação para estas instâncias, totalizando 10 variáveis (WOLBERG; MANGASARIAN, 1990).

As características armazenadas na base de dados são as seguintes:

- I. espessura da massa celular (CT);
- II. uniformidade do tamanho da célula (CS);
- III. uniformidade do formato da célula (CH);
- IV. adesão marginal (AD);
- V. Tamanho de uma célula epitelial (EP);
- VI. núcleo vazio (BN);
- VII. cromatina branda (CO);
- VIII. nucléolo normal (NN);
- IX. mitose (MM);
- X. classificação (“benigno” ou “maligno”).

Esta base de dados possui 699 amostras, sendo que 65% representam tumores benignos e 35% representam tumores malignos (WOLBERG; MANGASARIAN, 1990). Neste problema, a classe 2 corresponde a um padrão normal (“benigno”) e a classe 4 corresponde a um padrão anormal (“maligno”).

3 | ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

O Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) é inspirado na seleção negativa de linfócitos T que ocorre no timo, representando a análise que o organismo realiza para diferenciar as células entre próprias e não-próprias. Este algoritmo é executado em duas fases conforme descrito em (FORREST et al., 1994; LIMA et al., 2013):

1. Censoriamento

- a) Definir o conjunto de cadeias próprias (S) que se deseja proteger;
- b) Gerar cadeias aleatórias e avaliar a afinidade (Match) entre cada uma delas e as cadeias próprias. Caso a afinidade seja superior a um limiar estipulado, deve-se rejeitar a cadeia. Caso contrário, deve-se armazenar em um conjunto de detectores (R).

2. Monitoramento

- a) Dado o conjunto de cadeias que se deseja proteger (cadeias protegidas), avaliar a afinidade entre cada uma delas e o conjunto de detectores. Se a afinidade for superior a um limiar preestabelecido, então um elemento não-próprio é identificado.

Na figura 1 apresentam-se os fluxogramas do ASN, em 1 (a) a fase de censoriamento e 1 (b) a fase de monitoramento.

Na fase de censoriamento do ASN, são definidos, inicialmente, os de detectores próprios, que representam a condição normal do problema, sendo conhecido como cadeias próprias (S). O objetivo desta fase é gerar o conjunto de padrões detectores (R), que tenham a capacidade de reconhecer algum padrão não-próprio, na fase de monitoramento dos dados. Na fase de monitoramento, faz-se um monitoramento nos dados visando identificar mudanças no comportamento das amostras e, então, classificar estas mudanças utilizando o conjunto de detectores criados na fase de censoriamento. Assim, analisando-se as cadeias protegidas (S) e comparando-as com o conjunto de detectores (R), avalia-se a afinidade entre cada uma das cadeias. Caso a afinidade seja superior a um determinado limiar, então, o elemento não-próprio é detectado e classificado.

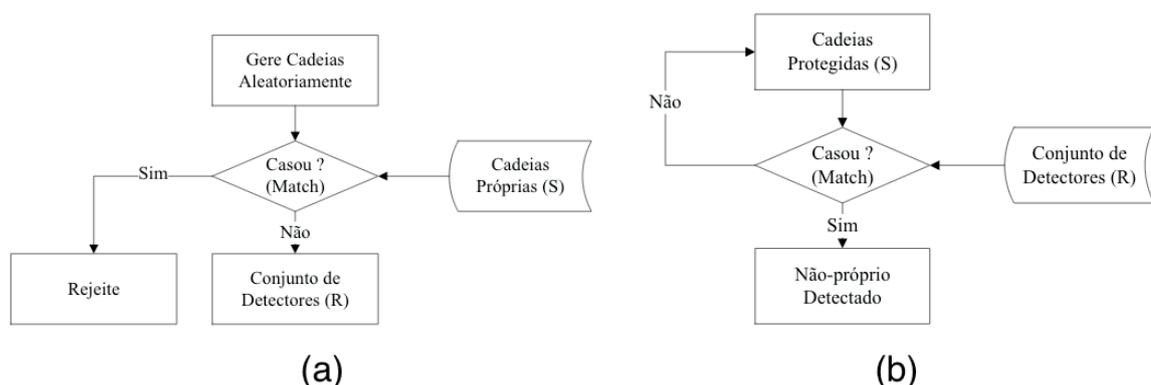


Figura 1 - Fluxogramas do ASN.

Fonte: (LIMA et al., 2013).

Para avaliar a afinidade entre as cadeias e assegurar que são semelhantes, utiliza-se um critério denominado casamento. O casamento pode ser perfeito ou parcial. Neste capítulo, optou-se por utilizar o casamento parcial proposto em (BRADLEY, TYRRELL, 2002), onde a taxa de afinidade representa o grau de semelhança que deve ocorrer entre as duas cadeias em análise para que o casamento seja confirmado.

A taxa de afinidade é definida através da seguinte equação (BRADLEY, TYRRELL, 2002):

$$TAf = \left(\frac{An}{At} \right) * 100 \quad (1)$$

sendo:

TAf : taxa de afinidade;

An : número de cadeias próprias no problema;

At : número total de cadeias no problema.

Através da equação (1), é possível calcular, de forma estatística, o valor da taxa de afinidade para o problema proposto. A expressão (2) representa a forma de quantificar a afinidade total entre os padrões em análise (BRADLEY, TYRRELL, 2002):

$$Af_T = \frac{\sum_{i=1}^L Pc}{L} * 100 \quad (2)$$

sendo:

Af_T : % de afinidade entre os padrões;

L : quantidade total de posições do padrão;

Pc : posição casada;

$\sum_{i=1}^L Pc$: quantidade de posições casadas.

Desta forma, se Af_T for maior ou igual a TAf ocorre o casamento entre os padrões, ou seja, eles são considerados semelhantes. Caso contrário, não ocorre o casamento entre os sinais.

4 | METODOLOGIA PROPOSTA

O sistema de diagnóstico de câncer de mama apresentado nesta seção é baseado nos sistemas imunológicos artificiais, em especial no algoritmo de seleção negativa. O método proposto se divide em duas fases: sensoriamento e o monitoramento dos dados. Na sequência apresenta-se o conjunto de testes e as fases de sensoriamento e de monitoramento do sistema de diagnóstico de câncer de mama.

4.1 CONJUNTO DE TESTES

A base WBCD possui 10 atributos, no entanto, para este capítulo optou-se por utilizar uma quantidade menor de atributos para realizar o diagnóstico. Para escolher quais atributos utilizar foi feito um processo de escolha com base no cálculo do desvio padrão das amostras. Foram escolhidos os cinco atributos que apresentaram os índices mais baixos de desvio padrão, ou seja, os dados são mais homogêneos. Foi adotada esta escolha visando proporcionar maior confiabilidade para o sistema.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

As variáveis escolhidas são: a espessura da massa celular (CT), a uniformidade do tamanho da célula (CS), a uniformidade do formato da célula (CH), o núcleo vazio (BN) e o nucléolo normal (NN). Durante a separação destas variáveis observou-se que alguns dados não são aproveitáveis, portanto, na tabela 1 são apresentados os dados e características da base de dados WBCD que foram utilizados.

Base de dados	UCI Wisconsin Breast Cancer Data
Tipo	Classificação
Número de dados	699
Número de dados aproveitáveis	683
Dados da classe “benigno”	444
Dados da classe “maligno”	239
Número de atributos	5

Tabela 1 - Especificação da base de dados WBCD.

Fonte: Elaborados pelos Autores.

4.2 FASE DE CENSORIAMENTO

O módulo de aquisição de dados é constituído pelo aparato experimental responsável por capturar os sinais na estrutura do edifício, tais como sensores, acelerómetros, etc.

Nesta fase são gerados os detectores para serem utilizados pelo SIA durante o processo de monitoramento. Devido ao problema de diagnóstico clínico de câncer de mama ter duas classes de padrões, é necessário somente que o algoritmo tenha conhecimento das amostras normais (próprios), para com base nestas informações realizar a discriminação do que é próprio (benigno) e do que é não-próprio (maligno). Assim o funcionamento desta fase é apresentado na figura 2, onde se ilustra como é realizado o processo de geração dos detectores benignos (próprios).

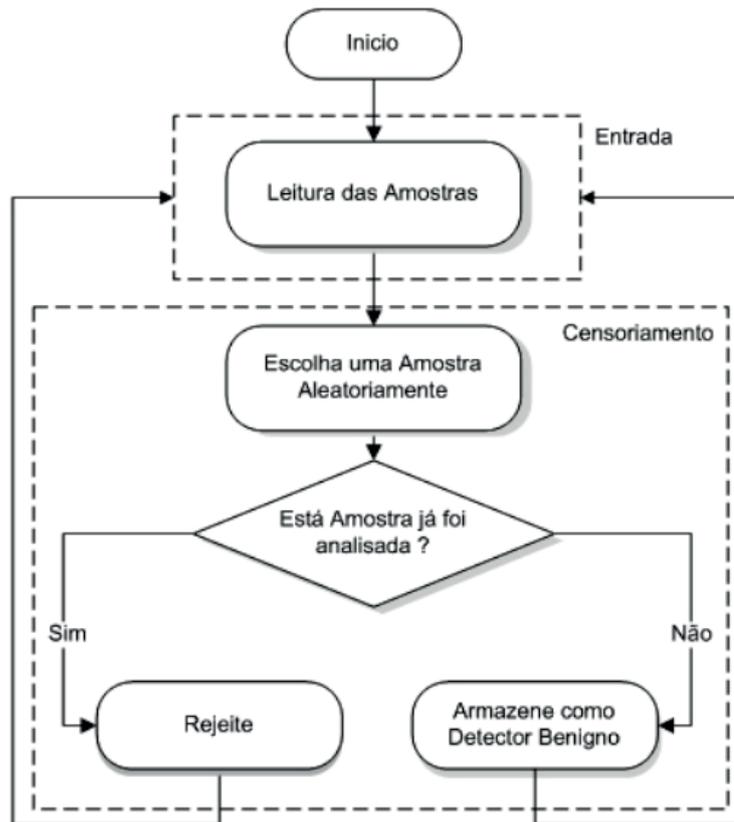


Figura 2 - Esquema do censuriamento do sistema de diagnóstico.

Fonte:Elaborados pelos Autores.

Foi utilizado o critério de casamento parcial (Bradley e Tyrrell, 2002). Utilizando a equação (1) nas especificações da base de dados do problema, calcula-se a taxa de afinidade. Assim tem-se um total de 683 amostras, sendo 444 amostras normais, isto é, sem câncer, e o cálculo é dado da seguinte forma:

$$TAf = \left(\frac{444}{683} \right) * 100 = 65\% \quad (4)$$

O valor da taxa de afinidade é de 65%, e isto significa que para confirmar um casamento entre duas amostras de câncer é necessário que no mínimo 65% das variáveis se casem, desta forma pode-se garantir que as amostras são semelhantes.

4.3 FASE DE MONITORAMENTO

O módulo de aquisição de dados é constituído pelo aparato experimental responsável por capturar os sinais na estrutura do edifício, tais como sensores, acelerómetros, etc. A fase de monitoramento é dividida em dois módulos, os quais são responsáveis por fazer a leitura do conjunto de testes e realizar a discriminação próprio/não-próprio. Na fase de monitoramento faz-se a leitura das amostras que se deseja analisar (conjunto de testes). Essas amostras são comparadas aos detectores benignos (próprios) gerados

previamente na fase de sensoriamento. Realizando a comparação da amostra com o conjunto de detectores, avalia-se o casamento e a afinidade entre a amostra e o conjunto de detectores. Caso a afinidade seja satisfeita, ou seja, se existir semelhança entre as amostras analisadas é considerado um casamento e, então, a amostra é diagnosticada como “benigna”, por ter características próprias. Caso contrário, não existe o casamento entre as amostras em análise, assim a amostra é diagnosticada como “maligna”. Este processo é repetido em cada amostra, e assim é realizado o monitoramento dos dados.

A figura 3 ilustra o funcionamento do processo de monitoramento do sistema de diagnóstico.

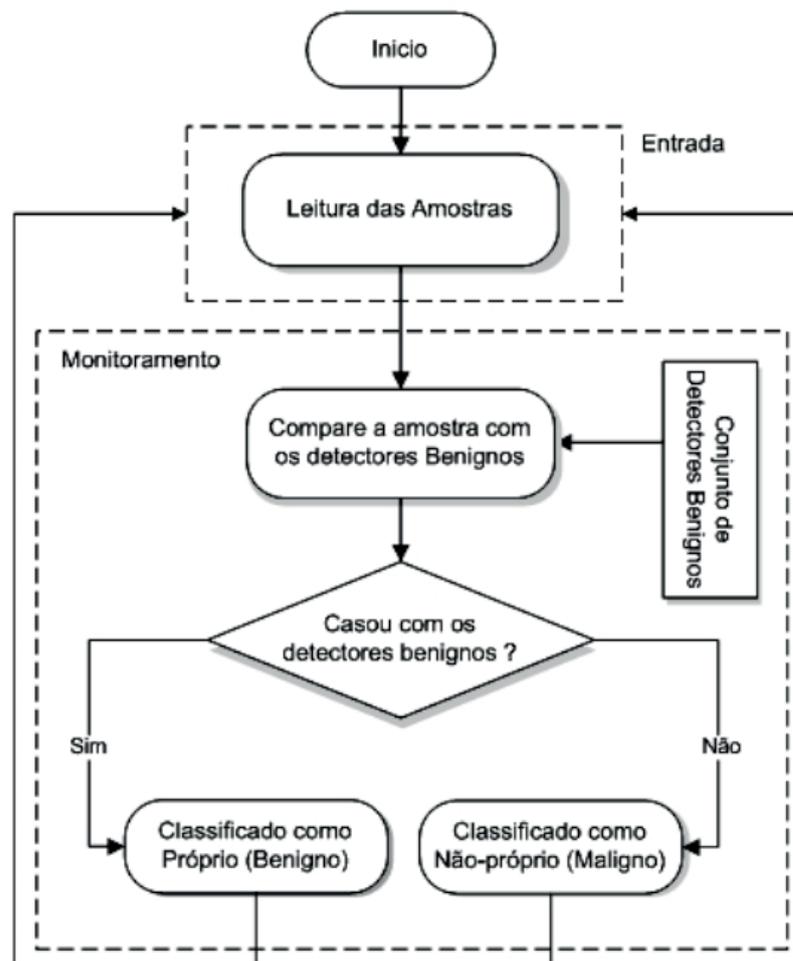


Figura 3 - Esquema do monitoramento do sistema de diagnóstico.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

5 | RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação do método proposto na base de dados WBCD. O algoritmo foi desenvolvido em MATLAB (MATLAB, 2011).

No teste realizado o objetivo foi avaliar o método proposto, verificando a eficiência,

precisão e o tempo computacional em relação a diferentes conjuntos de detectores benignos. Utilizou-se como parâmetro uma taxa com um valor fixo de 65%. Foram gerados três conjuntos de detectores benignos, sendo os conjuntos *I*, *II* e *III* que possuem 5, 10 e 20 padrões detectores, respectivamente. Os conjuntos de detectores gerados utilizam 1,12%, 2,25% e 4,50% das amostras benignas, que tem um total de 444 amostras. Vale ressaltar que como o processo é aleatório o conjunto de detectores uma vez gerado, provavelmente não será gerado novamente.

Na tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos pelo sistema de diagnóstico, quando aplicado à base de dados WBCD (WOLBERG; MANGASARIAN, 1990).

Neste teste foi possível observar que o sistema de diagnóstico apresenta um bom desempenho (índice de acerto superior a 93%), e que a quantidade de detectores benignos influencia diretamente no diagnóstico final. Comumente utiliza-se até 30% das informações da base de dados para gerar detectores, porém, neste caso, a proposta é utilizar no máximo 5% dos dados, visando proporcionar robustez ao diagnóstico. À medida que a quantidade de detectores aumenta, o diagnóstico se torna mais preciso, isto porque quanto mais conhecimento, mais eficiente é o processo de diagnóstico.

Diagnóstico	Conjunto de detectores		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Amostras testadas	683	683	683
Classificações Benignos	413	434	443
Classificações Malignos	270	249	240
Acerto (%)	93,01%	97,74%	99,77%
Erro (%)	6,99%	2,26%	0,23%
Tempo (ms)	84,60	81,20	84,41

Tabela 2 - Resultados obtidos pelo método.

Fonte: Elaborados pelos Autores.

A sensibilidade (*S*) e a especificidade (*E*) do método são dadas pelas seguintes equações:

$$S = \frac{VP}{VP + FP} \quad (5)$$

$$E = \frac{VN}{FN + VN} \quad (6)$$

em que *VP* é verdadeiro positivo, *VN* é verdadeiro negativo, *FP* é falso positivo e *FN* é falso negativo.

Portanto a sensibilidade do método para este problema é de 100%, e isto significa

que nenhum indivíduo doente ficaria sem tratamento. E a especificidade é de 99,77 % o que significa que 0,23% (1 indivíduos) receberia o tratamento sem necessidade.

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A melhor configuração do sistema de diagnóstico proposto neste trabalho obteve um índice de acerto de 99,7%, isto comprova que o algoritmo de seleção negativa é eficaz no processo de diagnóstico. Vale ressaltar que para este capítulo utilizou-se apenas 5% da informação das amostras para gerar os detectores benignos, o que é uma quantidade muito reduzida de informação. Isto evidencia que o método é robusto e preciso no processo de diagnóstico. O tempo de execução é bem reduzido, o que proporciona rapidez no diagnóstico.

Na tabela 3 apresenta-se um estudo comparativo entre o método proposto e os principais métodos disponibilizados na literatura que utilizam a base de dados WBCD para avaliar o processo de diagnóstico de câncer de mama.

Referência	Técnica Utilizada	Acerto (%)
(MEESAD; YEN, 2003)	Fuzzy	96,71
(WANG; GEORGE LEE, 2002)	ANFIS	96,30
(CAMASTRA, 2006)	Kohonen	96,70
(WANG; GEORGE LEE, 2002)	<i>Backpropagation</i>	95,16
(ZHAO; DAVIS, 2011)	SIA e rede neural de base radial	99,58
(SILVA et al., 2014)	ARTMAP-Fuzzy	94,43
Este trabalho	Algoritmo de seleção negativa	99,70

Tabela 3 - Análise comparativa de resultados.

Fonte: Elaborados pelos Autores.

Conforme tabela 3, o método apresenta acerto superior as outras técnicas.

6 | CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado um método de diagnóstico de câncer de mama baseado nos sistemas imunológicos artificiais. Foram descritas as principais etapas e características do ASN e sua aplicação no problema proposto. Como dados de entrada do sistema, o algoritmo precisa apenas de cinco atributos das amostras de câncer de mama. O algoritmo proposto apresentou excelentes resultados obtendo um índice de acerto de 99,77% em todas as amostras testadas. A fase de geração de detectores é a que demanda maior tempo computacional, porém é executada de forma off-line não acarretando prejuízo ao algoritmo. Deve-se ressaltar que com uma quantidade mínima de informações, isto é, com um conjunto de detectores bem reduzido, o método foi capaz

de realizar o diagnóstico com muita precisão e segurança. A fase de monitoramento do sistema, a partir da leitura dos dados, é realizada rapidamente, com tempo inferior a 90 milésimos de segundo, o que credencia o algoritmo a ser uma ferramenta utilizada em tempo real, já que as decisões precisam ser tomadas rapidamente.

Desta forma conclui-se que o sistema de diagnóstico proposto com base nos sistemas imunológicos é bastante eficiente, confiável, robusto e seguro quando aplicado no diagnóstico de amostras de câncer de mama.

REFERÊNCIAS

BRADLEY, D.W.; TYRRELL, A.M. Immunotronics - Novel Finite-State-Machine Architectures with Built-In Self-Test Using Self-Nonself Differentiation. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Vol. 6, pp. 227–238, 2002.

CAMASTRA, F. Kernel Methods For Clustering. In **WIRN/NAIS**, volume 3931 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 1–9, 2006.

DASGUPTA, D. **Artificial Immune Systems and Their Applications**. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 1998.

CASTRO, L. N. **Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2001.

CASTRO, L. N.; TIMMIS, J. **Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach**, Springer. 1st edition, 2002.

FORREST, S. A.; PERELSON, A. L.; CHERUKURI, R. Self-Nonself Discrimination in a computer. In: **Proc. do IEEE Symposium on Research in Security and Privacy**, pp. 202-212, 1994.

INCA - Instituto Nacional do Câncer (Brasil), disponível em: <www.inca.gov.br>, acessado em: 01/09/2012.

JUNG, J-S. R. ANFIS: Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Vol. 23, No. 3, p. 665-685, 1993.

LIMA, F.P.A.; LOTUFO, A.D.P.; MINUSSI, C.R. Artificial Immune Systems Applied to Voltage Disturbance Diagnosis in Distribution Electrical Systems. In: **PowerTech-2013**, Grenoble, France, June-2013, 2013, 6 pp.

MANIKANTAN, K.; SAYED, S.I.; SYRIGOS, K.N.; RHYS-EVANS, P.; NUTTING, C.M. HARRINGTON, K.J.; KAZI, R. Challenges for the Future Modifications of the TNM: Staging System for Head and Neck Cancer. **Cancer Treatment Reviews**, pg. 35-44, 2009.

Matlab (2011). 7.8 Version, Mathworks Company.

MEESAD, P.; YEN, G. G. Combined Numerical and Linguistic Knowledge Representation and Its Application to Medical Diagnosis, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. 2003.

OMS - Organização Mundial da Saúde, Disponível em: <<http://www.who.int/en/>>, acessado em: 01/09/2012.

PENA-REYES, C. A.; SIPPER, M. Designing Breast Cancer Diagnostic System via Hybrid Fuzzy-Genetic Methodology, **IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceeding**, 1999.

SILVA, J. C.; LIMA, F.P.A.; LOPES, M. L. M.; MINUSSI, C. R. (2014). Utilizando uma Rede Neural Artificial ARTMAP-Fuzzy para Realizar o Diagnóstico Clínico de Amostras de Câncer de Mama, in: **CMAC-Sul (Congresso de Matemática Aplicada e Computacional)**, Curitiba, pp. 1-6.

WANG, J.; GEORGE LEE, C. S. Self-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Classification Applications, **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, pp. 790-802, 2002.

WBCD, (2012). Wisconsin Breast Cancer Data – UCI Machine Learning Repository, disponível em: <<http://www.archives.ics.uci.edu/ml/>>.

WOLBERG, W. H.; MANGASARIAN, O. L. Multisurface Method of Pattern Separation for Medical Diagnosis Applied to Breast Cytology, In: **Proceedings da Academia Nacional de Ciências dos EUA**, Volume 87, p. 9.193-9.196, 1990.

ZHAO, W.; DAVIS, C. E. A Modified Artificial Immune System Based Pattern Recognition Approach – An Application to Clinical Diagnostics. **Artificial Intelligence in medicine**, Elsevier, n° 52, pp. 1-9, 2011.

AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS NÃO INVASIVAS DE MEDIÇÃO DE GLICOSE EM HUMANOS

Data de aceite: 01/06/2020

Leanderson André

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.
Engenharia Elétrica, Joinville
leanderson.andre@gmail.com

Pedro Bertemes Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.
Engenharia Elétrica, Joinville

RESUMO: A diabetes é uma doença relacionada com a desordem no nível de glicose no sangue. Tanto o baixo e o alto nível de glicose pode resultar em dano sérios e até mesmo a morte do indivíduo. Dada esta importância, diferentes métodos foram propostos para identificar a quantidade de glicose no sangue. Os métodos pode ser classificados em técnicas invasivas e técnicas não invasivas. As técnicas invasivas são aquelas que utilizam algum tipo de fluido do corpo, por exemplo o sangue. Estas técnicas possuem como principal desvantagem, o desconforto e o risco de infecções pela contínua retirada de sangue. Em contrapartida as técnicas não invasivas não utilizam quaisquer fluidos gerados pelo corpo. Este artigo busca identificar quais são as técnicas não invasivas aplicadas na medição de glicose em humanos.

Um mapeamento sistemático de literatura foi conduzido para identificar tais métodos e classificá-las. Foram encontrados 108 trabalhos que utilizam métodos não invasivos. Destes métodos foi observado que o *Near-Infrared Spectroscopy* foi a técnica mais utilizada em 36 trabalhos. Em relação a combinações de técnicas foram encontrados apenas 8 trabalhos. Portanto, há muitas oportunidades de pesquisas envolvendo a utilização de dois ou mais técnicas simultaneamente na medição não invasiva de glicose em humanos.

PALAVRAS-CHAVE: Glicose, medição não-invasiva, mapeamento sistemático, técnicas de medição.

ABSTRACT: Diabetes is a disease related to the disorder in the blood glucose level. Both the low and the high glucose level can result in serious damage and even the death of the individual. Given this importance, different methods have been proposed to identify the amount of glucose in the blood. The methods can be classified into invasive techniques and non-invasive techniques. Invasive techniques are those that use some type of fluid from the body, for example blood. These techniques have as main disadvantage, discomfort and the risk of infections due to continuous blood

withdrawal. In contrast, non-invasive techniques do not use any fluids generated by the body. This article seeks to identify which are the non-invasive techniques applied in the measurement of glucose in humans. A systematic mapping of the literature was conducted to identify such methods and to classify them. It was found 108 studies using non-invasive methods. Between these methods, it was observed that the Near-Infrared Spectroscopy was the most used technique in 36 studies. Regarding combinations of techniques, only 8 studies were found. Therefore, there are many research opportunities involving the use of two or more techniques simultaneously in the non-invasive measurement of glucose in humans.

KEYWORDS: Glucose, non-invasive measurement, systematic mapping, measurement techniques.

1 | INTRODUÇÃO

A glicose possui um papel fundamental no corpo humano, sendo a sua principal fonte de energia. O excesso (hiperglicemia) e a falta (hipoglicemia) de glicose pode levar o surgimento de diversas doenças e causar a morte do indivíduo. O excesso de glicose quando ocasionado pela falta de insulina é uma doença conhecida pelo nome de diabetes. Esta doença segundo a Organização Mundial da Saúde foi responsável pela morte de 1,6 milhões de pessoas em 2016. Por isso é de importância vital que os indivíduos monitorem continuamente o seu nível de glicose. A medição da glicose pode ser realizada com diversos métodos, geralmente classificados em métodos invasivos e métodos não invasivos.

Os métodos invasivos são aqueles que necessitam utilizar uma pequena quantidade de sangue do indivíduo para aplicar algum tipo de reações químicas para medir a quantidade de glicose. Porém estes métodos causam desconforto e dor após o uso repetido, mas também apresentam riscos de potencial infecção e dano tecidual (So et al. 2012) Além disso, estes procedimentos normalmente custam caro para os pacientes.

Devido a estas questões, os métodos não invasivos tem recebido uma atenção especial pela comunidade. De acordo com Gonzales (Villena Gonzales et al. 2019), os métodos não invasivos são as tecnologias que dependem apenas de alguma forma de radiação, sem a necessidade de acesso a qualquer fluido corporal. Algumas dessas tecnologias que podem ser destacadas são a bioimpedância elétrica (*electrical bioimpedance*) e infravermelho próximo (*near-infrared*) (Santos, 2018) Trabalhos de revisões dos principais métodos não invasivos podem ser encontrados em (Poddar et al. 2008, Villena Gonzales et al. 2019, Sabu et al. 2019, Kim et al. 2018, Zheng et al. 2018).

A qualidade de vida de um indivíduo é afetada pelo monitoramento constante do nível de glicose no sangue. A execução de atividades rotineiras devem ser adaptadas, limitadas e bem planejadas dependendo do seu nível de glicose. Os métodos não invasivos podem ser utilizados como uma forma de minimizar este incômodo, e conseqüentemente, melhorar

a qualidade de vida. Por exemplo, pode-se desenvolver dispositivos portáteis que realizam o monitoramento constante de maneira automatizada, permitindo a visualização do nível de glicose simplificada, como em um relógio e emitir alertas quando atingir níveis críticos. A possibilidade de contribuir para uma melhor qualidade de vida das pessoas é a principal motivação deste trabalho.

O primeiro passo no desenvolvimento de um dispositivo de monitoramento não invasivo de glicose é a definição de quais técnicas de captura de sinais devem ser utilizadas. Na literatura é possível encontrar diversas técnicas aplicadas para este fim. Sergio (Santos 2018), em seu trabalho, utiliza as técnicas bioimpedância elétrica e infravermelho próximo combinadas como dados de entradas para redes neurais. Sua conclusão foi que estas técnicas combinadas podem resultar em uma melhor precisão na predição do nível de glicose.

Este resultado leva a questionar se adicionar mais informações obtidas por diferentes técnicas não invasivas é possível obter um nível maior de acerto na predição de glicose. Indo um pouco mais além, quais dessas técnicas podem ser combinadas satisfatoriamente?

Devido a grande quantidade de técnicas não invasivas, criar um dispositivo portátil que utilize todas estas técnicas combinadas é uma tarefa inviável. Muitas dessas técnicas podem ser utilizadas com diferentes frequências ou faixas para capturar os sinais. Isto nos leva a uma gama de possibilidades, ou seja, um problema combinatorial.

Desde modo, o primeiro passo a ser realizado é uma revisão da literatura em busca das principais técnicas de medição não invasiva e das combinações aplicadas entre estas técnicas. Esta revisão poderá indicar quais são as técnicas que são mais utilizadas, ou seja, que normalmente apresentam um bom desempenho. Conseqüentemente, poderá indicar quais técnicas não são muito utilizadas o que pode indicar um baixo desempenho, alto custo ou alta complexidade na utilização. Em relação as combinações de técnicas a revisão poderá indicar quais combinações são interessantes de utilizar e experimentar e quais não são tão interessantes, evitando assim, uma experimentação por tentativa e erro com todas as combinações possíveis. Além disso, poderá indicar potenciais combinações ainda não experimentadas.

Portanto o presente artigo tem como propósito identificar as tecnologias mais utilizadas, revisar e classificar os métodos aplicados especificamente na extração de sinais de medição não invasiva de glicose em humanos, como também demonstrar as principais combinações das técnicas utilizadas.

2 | METODOLOGIA

O mapeamento sistemático da literatura (MSL) é uma metodologia de pesquisa em largura proposta por Petersen (Petersen et al. 2008, Petersen et al. 2015). O MSL é indicado para identificar lacunas e analisar o estado das publicações da área de interesse.

Por seguir um protocolo, o MSL pode ser replicado por outros pesquisadores. As etapas que constituem o MSL são: questão de pesquisa, estratégia de busca, estratégia de seleção e estratégia de extração.

A questão de pesquisa desse estudo é identificar as tecnologias não invasivas de medição de glicose em humanos. A estratégia de busca se baseia na utilização de um texto de busca (do inglês *string*), que será utilizado nos mecanismos de buscas acadêmicas (MBA). Para isso o texto de busca foi criado a partir das palavras-chave da questão de pesquisa, juntamente com seus respectivos sinônimos. As palavras-chave são utilizadas na língua inglesa. Na Tabela 1 é apresentado o texto de busca final que será utilizada nos MBAs.

(measure OR monitoring OR determination)*
AND (non-invasive OR noninvasive)
AND (glucose) AND (sensor)

Tabela 1: Texto de busca utilizada nos mecanismo de busca acadêmicas

Fonte: Autores

As MBAs selecionados para esta pesquisa foram IEEE Xplorer, PubMed, ScienceDirect, Scopus e Web of Science. O texto de busca foi aplicada aos mesmos metadados (título, resumo e palavras chaves) em todas os MBAs e limitada a estudos publicados a partir de Janeiro de 2015.

Para cada um dos artigos encontrados, foram aplicados os seguintes critérios de exclusão (CE): CE1: Trabalhos escritos em idiomas diferentes de inglês e português; CE2: Trabalhos com mais de 5 anos; CE3: Trabalhos que não estejam disponíveis na internet; CE4: Trabalhos com estudos que não são relacionados com a medição de glicose; CE5: Trabalhos com estudos que não utilizam tecnologias não invasiva; CE6: Trabalhos apresentados em forma de sumários ou apresentações (literatura cinza) e fontes secundárias (revisões sistemáticas e estudos de mapeamento); CE7: Trabalhos que apresentam o mesmo estudo. O trabalho mais completo é mantido; CE8: Trabalhos duplicados.

A partir da leitura completa dos artigos selecionados, são extraídos as informações de título, autor(es), ano de publicação, tipo de fonte (jornal, revista, etc) e nome da fonte. Em relação ao estudo apresentado nos trabalhos selecionados são levantadas as seguintes informações: as tecnologias aplicadas para extração de sinais; as combinações entre as tecnologias, e modelos computacionais utilizados na predição de quantidade de glicose.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados do mapeamento sistemático. O principal

objetivo é identificar as principais técnicas aplicadas na medição não invasiva de glicose. Na Figura 1 é apresentado cada um dos passos executados no mapeamento. Inicialmente é executado a pesquisa nos mecanismos de buscas que retorna 882 artigos. Na sequência é identificado 423 artigos duplicados, que foram obtidos de diferentes bases de dados. Dos 459 artigos restantes, são aplicados os critérios de inclusão e exclusão baseados na leitura do título e resumo, restando 256 artigos. Na última etapa, são lido os 256 artigos aplicando novamente os critérios de inclusão e exclusão, onde é removido 148 artigos. O final do processo é uma lista de 108 artigos que são utilizados como fonte para esta pesquisa.

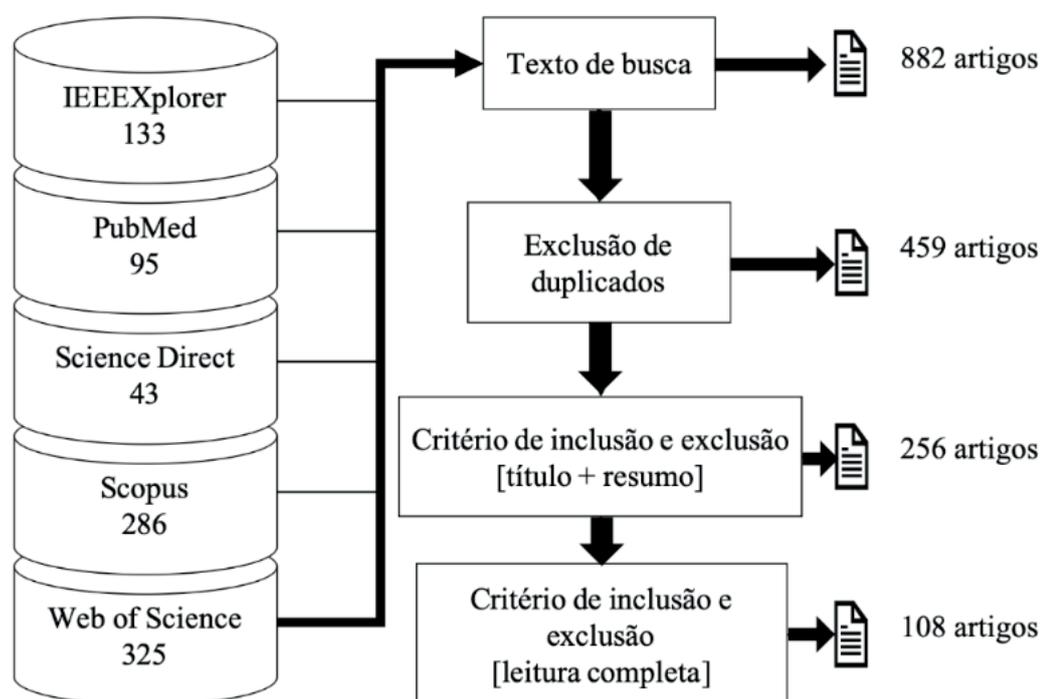


Figura 1: Visão geral do processo de filtragem de artigos

A Tabela 2 apresenta a distribuição dos artigos selecionados por base de dados. Na tabela é apresentado a quantidade total encontrada em cada uma das bases. Pode-se observar foram encontrados um total de 229 artigos, porém os artigos se repetem em mais de uma base de dados. Na coluna exclusivo é apresentado a quantidade de artigos encontrados exclusivamente em uma única base de dados. Pode-se observar que as bases PubMed e ScienceDirect não foram relevantes, ou seja, todos os artigos encontrados nestas bases também foram encontradas em outras bases de dados. Em contrapartida, nas bases IEEE Explorer e Scopus foram encontrados mais artigos exclusivos.

	Total	Exclusivo
IEEEExplorer	65	19
PubMed	10	0
ScienceDirect	7	0
Scopus	78	12
Web of Science	69	7
Total	229	38

Tabela 2: Distribuição dos artigos selecionados por base de dados

Na Figura 2 é apresentado os tipos de publicações (revista de artigos ou anais de congressos) por base de dados. As publicações em conferências se concentram principalmente em IEEEExplorer, Web of Science e Scopus com 55, 48 e 39 artigos respectivamente. Em contrapartida, as publicações em revistas se concentram em Scopus e Web of Science com 30 artigos cada.

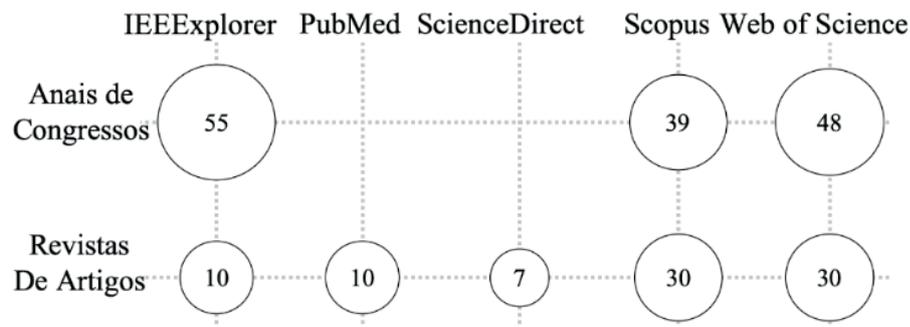


Figura 2: Quantidade de tipos de publicações encontradas por mecanismo de busca

Em relação a frequência de publicação, cerca de 63% dos artigos foram publicados nos últimos três anos, como mostra a Figura 3. O gráfico apresenta uma tendência de crescimento, demonstrando a importância e potencial da área de pesquisa. É importante resaltar, que o gráfico apresenta uma queda no ano de 2019, porém espera-se que muitos estudos ainda serão publicados sobre o tema ao longo deste ano.

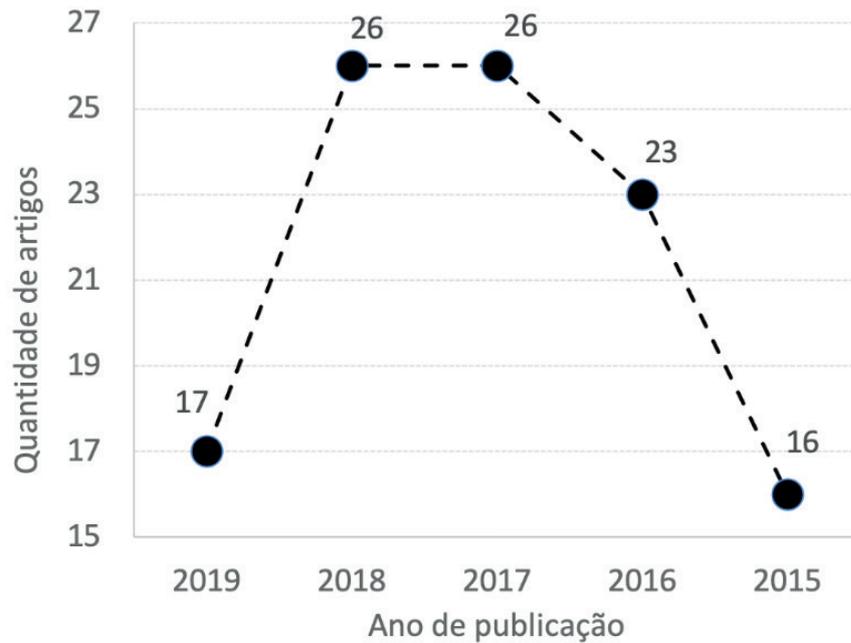


Figura 3: Quantidade de publicações por ano

Os artigos selecionados foram classificados de acordo com as técnicas não invasivas utilizadas na medição de glicose. Na Figura 4 é apresentado a distribuição desses artigos. Os métodos que se destacaram foram *Near-Infrared Spectroscopy* (NIR), *Microwave*, *Photoacoustic Spectroscopy* e *Bioelectrical Impedance Spectroscopy* com 36, 24, 12 e 12 trabalhos respectivamente. Estes são os métodos que apresentam o maior interesse pelos pesquisadores representando 73% dos dados obtidos. Na categoria *Outros* foram incluídos as técnicas que apresentam 1 ou 2 trabalhos relacionados, como por exemplo *raman spectroscopy* e *polarimetry spectroscopy*.

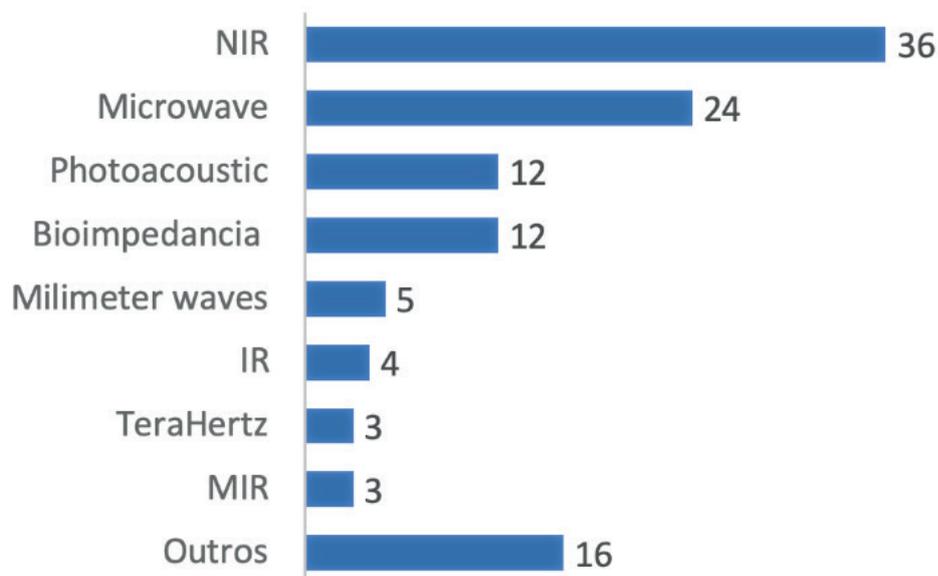


Figura 4: Quantidade de publicações por método não invasivo

Os métodos que apresentaram o maior interesse pelos pesquisadores, são apresentados na Figura 5 distribuídos por ano de publicação. Pode-se observar que o método *Photoacoustic Spectroscopy* apresenta uma tendência de queda. Isto pode significar que esta técnica já foi utilizada todo o seu potencial. Já as demais técnicas, *Near-Infrared Spectroscopy* (NIR), *Microwave* e *Bioelectrical Impedance Spectroscopy* apresentam uma tendência de crescimento em suas aplicações.

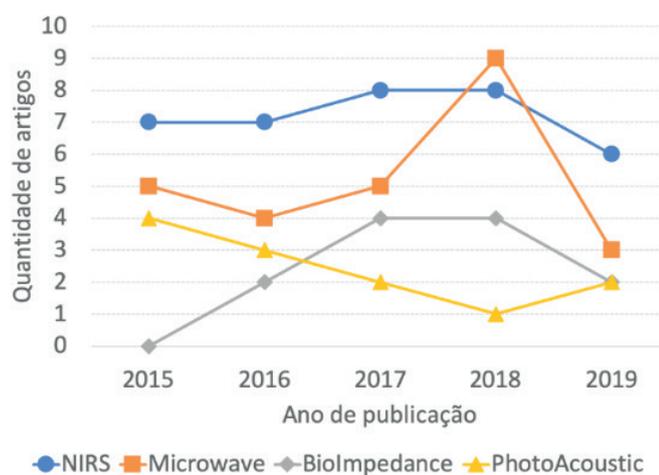


Figura 5: Quantidade de publicações por ano e método não invasivo

A combinação destas técnicas de medições, segundo os dados obtidos neste mapeamento, não apresenta um área de grande interesse pelos pesquisadores. Na Tabela 3 é apresentado os dados obtidos. Cerca de 100 artigos utilizaram apenas uma técnica de maneira isolada e apenas 8 trabalhos apresentam algum tipo de combinação de sensores. As combinações encontradas foram: *infrared spectroscopy* e *ultrasonic micro-electro-micro mechanical* (IR-MEMS), *Near-Infrared Spectroscopy* com múltiplas frequências de sinais (NIR-Multifrequencia), *Bioelectrical Impedance Spectroscopy* e *Near-Infrared Spectroscopy* com múltiplas frequências de sinais (BI-NIR-Multifreq), *Bioelectrical Impedance Spectroscopy*, *Near-Infrared Spectroscopy* com múltiplas frequências de sinais, umidade e temperatura (BI-NIR-Multifreq-Umidade-Temperatura) e *Bioelectrical Impedance Spectroscopy*, *Near-Infrared Spectroscopy* e temperatura (BI-NIR-Temperatura). A combinação que se destacou foi a NIR-Multifrequencia com três artigos.

Combinação	Quantidade	Referência
Nenhum	100	
IR-MEMS	1	(Choi et al. 2017)
NIR-Multifrequencia	3	(Kascheev et al. 2017, Ficorella. 2015, Marius et al. 2019)
BI-NIR-Multifreq	2	(Zanon et al. 2018, Fouad et al. 2019)
BI-NIR-Multifreq-Umiade-Temperatura	1	(Geng et al. 2017)
BI-NIR-Temperatura	1	(Tronstad et al. 2019)

Tabela 3: Distribuição das combinações de técnicas não invasivas

Destes trabalhos que apresentaram uma combinação de técnicas, foram extraídos informações sobre o modelo computacional utilizado para fundir os dados e gerar a medição de glicose. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos. Pode-se destacar a utilização de redes neurais, sendo utilizada em 2 trabalhos e em um trabalho, em particular, a rede neural foi otimizada por um algoritmo genético. Outro fator importante, foi a falta de informações sobre o modelo computacional utilizado em dois trabalhos.

Método computacional	Quantidade
Análise multivariada	1
Análise de regressão múltipla	1
Análise de séries temporais	1
Redes neurais otimizado por algoritmo genético	1
Redes neurais	2
Não informado	2

Tabela 4: Distribuição dos métodos computacionais para combinar os diferentes sinais não invasivos

4 | CONCLUSÃO

A medição não invasiva do nível de glicose no sangue em humanos é uma área de pesquisa importante e pode melhorar significativamente a qualidade de vida de indivíduos com diabetes tanto no monitoramento como na prevenção de diversas doenças. Devido a complexidade de realizar a medição de maneira não invasiva, diferentes técnicas tem sido utilizadas na literatura. Neste trabalho foi utilizado o mapeamento sistemático para coletar, analisar e sumarizar as pesquisas neste tópico. Foram coletados 882 artigos de 5 bases e dados diferentes e analisados por diferentes critérios de inclusão e exclusão. Por fim, foi selecionado um conjunto de 108 artigos para ser analisados e extraídos as informações sobre as técnicas não invasivas. Foi observado que a *Near-Infrared Spectroscopy* foi a técnica mais utilizadas pelos pesquisadores em cerca de 36 trabalhos. As técnicas de *Microwave*, *Photoacoustic Spectroscopy* e *Bioelectrical Impedance Spectroscopy* também se destacaram. Foi observado que os pesquisadores não tem demonstrado interesse em realizar combinações entre as diferentes técnicas de medições. Das poucas combinações

propostas, foram utilizados as redes neurais para indicar o nível de glicose. Esta lacuna pode ser explorado e pode abrir novas oportunidades interessantes de pesquisas futuras. Como trabalhos futuros pretende-se ampliar o alcance do mapeamento sistemático para 10 anos e extrair informações sobre as bases de dados, experimentações e precisão dos resultados reportados nos artigos. Outra proposta é analisar a correlação entre os diferentes métodos e identificar quais são equivalentes e quais são complementares. Esta informação pode ser útil para propor combinações entre os diferentes métodos para melhorar a precisão da medição da glicose.

REFERÊNCIAS

Choi, H., Luzio, S., Beutler, J., and Porch, A. (2017). **Microwave noninvasive bloodglucose monitoring sensor: Human clinical trial results**. In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), pages 876–879.

Ficorella, A., D’Amico, A., Santonico, M., Pennazza, G., Grasso, S., and Zompanti, A. (2015). **A multi-frequency system for glucose detection with optical sensors**. In *2015 XVIII AISEM Annual Conference*, pages 1–3.

Fouad, M. M., Mahmoud, D. Y., and Abd El Ghany, M. A. (2019). **Joint NIR-BIS Based Non-Invasive Glucose Monitoring System**. In *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM*, volume 2018-Decem, pages 88–91. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Geng, Z., Tang, F., Ding, Y., Li, S., and Wang, X. (2017). **Noninvasive Continuous Glucose Monitoring Using a Multisensor-Based Glucometer and Time Series Analysis**. *SCIENTIFIC REPORTS*, 7.

Kascheev, N., Kozyrev, O., Leykin, M., and Vanyagin, A. (2017). **Non-invasive monitoring of blood glucose by means of wearable tracking technology**. In *2017 IEEE East-West Design Test Symposium (EWDTS)*, pages 1–4.

Kim, J., Campbell, A. S., and Wang, J. (2018). **Wearable non-invasive epidermal glucose sensors: A review**. *Talanta*, 177:163–170.

Marius, I. and Sever, P. (2019). **Algorithms of Absorbance and Colorimeter for Measuring Blood Glucose**. In *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, pages 1–6.

Organization, W. H. **Diabetes**. disponível em <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>.

Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., and Mattsson, M. (2008). **Systematic mapping studies in software engineering**. In *Ease*, volume 8, pages 68–77.

Petersen, K., Vakkalanka, S., and Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, 64:1–18.

Poddar, R., Andrews, J. T., Shukla, P., and Sen, P. (2008). **Non-invasive glucose monitoring techniques: A review and current trends**. *arXiv preprint arXiv:0810.5755*.

Sabu, C., Henna, T., Raphey, V., Nivitha, K., and Pramod, K. (2019). **Advanced biosensors for glucose and insulin**. *Biosensors and Bioelectronics*.

SANTOS, S. F. (2018). **Measuring and modelling blood glucose level using near infrared and bioimpedance data**. Master's thesis.

So, C.-F., Choi, K.-S., Wong, T. K., and Chung, J. W. (2012). **Recent advances in noninvasive glucose monitoring**. *Medical Devices (Auckland, NZ)*, 5:45.

Tronstad, C., Elvebakk, O., Staal, O. M., Kalvoy, H., Hogetveit, J. O., Jenssen, T. G., Birkeland, K. I., and Martinsen, O. G. (2019). **Non-invasive prediction of blood glucose trends during hypoglycemia**. *Analytica chimica acta*, 1052:37–48.

Villena Gonzales, W., Mobashsher, A. T., and Abbosh, A. (2019). **The progress of glucose monitoring—a review of invasive to minimally and non-invasive techniques, devices and sensors**. *Sensors*, 19(4):800.

Zanon, M., Mueller, M., Zakharov, P., Talary, M. S., Donath, M., Stahel, W. A., and Caduff, A. (2018). **First Experiences With a Wearable Multisensor Device in a Non-invasive Continuous Glucose Monitoring Study at Home, Part II: The Investigators' View**. *Journal of diabetes science and technology*, 12(3):554–561.

Zheng, H., He, J., Li, P., Guo, M., Jin, H., Shen, J., Xie, Z., and Chi, C. (2018). **Glucose screening measurements and noninvasive glucose monitor methods**. *Procedia computer science*, 139:613–621.

CAPÍTULO 18

ENTENDIMENTO DOS CONTROLES E POSSÍVEIS CONFLITOS DE PRIVACIDADE NAS REDES SOCIAIS ONLINE

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 12/03/2020

Talita de Souza Costa

Instituto Federal de São Paulo (IFSP-Campinas)

Campinas – SP – Brazil

<http://lattes.cnpq.br/2298306465245787>

Marbilia Possagnolo Sérgio

Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – (CTI)

Campinas – SP – Brazil

<http://lattes.cnpq.br/3950781480912294>

Regina Marin

Instituto Federal de São Paulo (IFSP-Campinas)

Campinas – SP – Brazil

<http://lattes.cnpq.br/9431970422211430>

RESUMO: As Redes Sociais Online (RSOs) disponibilizam configurações para que o usuário defina seu perfil de privacidade. Na publicação com outros autores, as RSOs priorizam a regra de postagem do editor podendo gerar conflitos de privacidade. O objetivo deste trabalho é analisar o nível de entendimento do usuário sobre a configuração de privacidade e a percepção quanto aos controles e possível existência de conflito de interesse nas RSOs, em especial quando ocorre o uso de TAG. Através da metodologia Survey obteve-se que as configurações de privacidade ainda são ineficientes e que há necessidade de se implementar uma estratégia nas RSOs para evitar conflitos.

PALAVRAS-CHAVE: Redes Sociais Online, Privacidade, Conflitos, TAG.

UNDERSTANDING THE CONTROLS AND POSSIBLE PRIVACY CONFLICTS IN ONLINE

ABSTRACT: The Online Social Networks (OSNs) provide settings for the user to define his privacy profile. In publishing with other authors, OSNs prioritize the publisher's posting rules, generating privacy conflicts. The objective of this work is to analyze the user's level of understanding about the privacy configuration and perception regarding the controls and possible existence of privacy conflict in OSNs, especially when occurs the usage of TAG. Through a Survey methodology it was found that privacy settings are still inefficient and there is a need to implement strategies in the OSNs to avoid conflicts.

KEYWORDS: Online Social Networks, Privacy, Conflicts, TAG.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as Redes Sociais Online (RSOs) deixaram de ser um fenômeno tecnológico para fazer parte do cotidiano das pessoas. Entre os Websites mais visitados do mundo estão as RSOs Facebook, Twitter, Instagram e Myspace, [NIELSEN, 2012]. As RSOs permitem que se reproduza na Internet o comportamento da sociedade, interações e relacionamentos. Cria-se perfis e se estabelece vínculos com outras pessoas. Segundo Xu (2019), a RSO é uma plataforma de conexão social. Diariamente, milhares de usuários fazem upload postam mensagens de textos, fotos ou vídeo em seu espaço virtual (*timeline*) e no de outros usuários. Uma relevante funcionalidade é a TAG que permitir descrever e marcar usuários numa postagem. Ela permite incluir uma legenda descritiva identificando os envolvidos. Este recurso foi originado da ideia de se organizar e compartilhar recursos na web [KLEMPERER 2012].

Nestes ambientes, [Marin, Piolle and Bidan 2014] afirmam que as atividades mais populares no ambiente de RSO é a marcação e criação de TAGs e que o compartilhamento, entre pessoas que aparecem numa mesma foto e referenciadas por TAG, pode caracterizar conflito de interesse. Cada TAG é uma referência explícita, que vincula a publicação ao *Timeline* de um usuário. Apesar do fato de que as RSOs atualmente fornecem mecanismos de controle de privacidade permitindo ao usuário, regular o acesso à informação contida em seus *Timeline*, infelizmente, não têm controle sobre os dados que residem fora de seus espaços. Como vários usuários conectados podem ter diferentes preocupações com a privacidade em relação aos dados a serem compartilhados, conflitos de privacidade ocorrem podendo aumentar o risco potencial de vazar informações confidenciais [Hu 2011].

As políticas de privacidade devem permitir ao usuário especificar quais as informações podem ser coletadas, como podem ser usadas, e com quem podem ser compartilhadas. Por exemplo, o usuário do Facebook pode configurar se os seus dados podem ser acessados por amigos, grupos específicos ou público em geral. Geralmente, os

controles implementados nas RSOs deveriam refletir o que é declarado nas suas políticas de privacidade, o que de fato não é observado [Anthonysamy 2011]. Uma vez colocado a divergência entre a política esperada e os controles implementados nas RSOs, analisar a percepção do usuário em relação aos controles de privacidade existentes passa a ser necessário para que medidas cabíveis possam ser tomadas na busca de um ambiente mais seguro.

Este trabalho, se propõe a analisar a percepção do usuário em relação ao gerenciamento de privacidade no Facebook. Esta pesquisa utilizou a metodologia Survey através de um questionário que visou obter informações quanto a percepção do usuário e capacidade de compreensão dos controles de privacidades existentes no Facebook, e se o mesmo está preparado para usá-los, para gerenciar possíveis conflitos existente nestes ambientes focando em discutir o entendimento de privacidade no que se refere ao uso de TAGs em imagens fotográficas.

Este capítulo de livro está organizado em seis seções. A seção 2 estabelece o conceito de privacidade e conflito em Redes Sociais Online. A seção 3 apresenta os trabalhos correlacionados. A seção 4 descreve a metodologia de trabalho realizado. A seção 5 apresenta os resultados observados após análise das respostas obtidas. A seção 6 sumariza as considerações finais.

2 | PRIVACIDADE, RSO E CONFLITO

Nesta seção é apresentada o que é rede social online e detalha o tratamento do Facebook quanto ao assunto privacidade e possíveis conflitos.

2.1 O que é uma Rede Social

Uma Rede Social é “uma plataforma de comunicação em rede onde os participantes podem criar perfis públicos ou parcialmente privados, conectar-se a outros usuários, interagir com os mesmos, compartilhar conteúdo, visualizar suas conexões e ver conexões atravessadas por outras conexões.” [Ellison e Boyd, 2013].

As principais redes sociais estão geralmente disponíveis em vários idiomas e permitem que os usuários se conectem com amigos ou pessoas através de fronteiras geográficas, políticas ou econômicas. Aproximadamente 2 bilhões de usuários de Internet estão usando redes sociais e esses números ainda deve crescer ainda mais, como uso de dispositivos móveis e redes sociais móveis segundo o site *Statista* (www.statista.com). Para Xu (2019), uma característica importante das redes sociais é fornecer meios favoráveis para que os usuários compartilhem informações com seu grupo de amigos ou não (grupo de amigos de seus amigos), dependendo de o perfil escolhido por ele e pelos seus amigos, isto é, se público ou privado. O trabalho de pesquisa é focado na análise da privacidade no Facebook o qual citamos a seguir.

2.2 O Facebook

Atualmente, o Facebook é a maior RSO do mundo com mais de 2.2 bilhões de usuários mensais. O Facebook permite que seus usuários, realizem várias ações em seu espaço virtual tais como: criar sua própria página na rede social, adicionar amigos, fazer upload de conteúdo, por exemplo: fotos, músicas, mensagens, compartilhar atualizações, marcar amigos em publicações utilizado *tags* e curtir uma publicação de um amigo [STATISTA, 2018].

A política de dados existente hoje no Facebook conta com 10 páginas e 4542 palavras, a data da sua última versão: 19 de abril de 2018, disponível em (<https://www.facebook.com/privacy/explanation>). O Facebook disponibiliza ferramentas de configurações de privacidade, onde o usuário pode definir seu perfil e limitar quem pode ver suas publicações. Também oferece configurações da *timeline* relacionadas a TAGs e afirma que se pode definir quem publica em sua *timeline* ou quem pode ver o que outras pessoas publicam na sua *timeline*. Já nas configurações de TAG, ele afirma que os usuários podem definir quem pode ver a publicação quando ele é marcado. E que o usuário tem a opção de analisar e decidir se quer uma marcação em uma publicação, antes de a mesma ser publicada na sua *timeline*.

2.3 Privacidade em Rede Social

A privacidade é complexa e difícil ter uma única definição, por ter noções e conceitos atrelados a uma questão cultural [MILBERG, 1995]. Assim, levando em consideração o contexto de privacidade nas RSOs, Dos Santos, Pereira e Feitosa (2017) afirmam que o princípio básico para que um usuário se sinta confortável em fazer parte de uma rede de informações e que ele tenha conhecimento sobre quais das suas informações privadas estão suscetíveis a acesso de terceiros e também quando possui controle sob as mesmas. Ela deve garantir a liberdade de expressão e permitir que os usuários exerçam total controle sobre seus dados pessoais. Seja em relação à coleta, uso, armazenamento e disseminação [BRASIL, 2018].

2.4 Conflitos de Privacidade em Redes Sociais Online

Gerenciamento de conflito de privacidades nas RSOs é um assunto bastante atual, há diversas pesquisas científicas relacionadas ao tema, que visam entender e mitigar propondo soluções para evitar tais conflitos. Marin (2014) afirma que existem variações nas políticas de privacidade entre as RSO. Mas, em sua maioria, elas não evitam situações conflitantes, sempre que mais de um usuário tem interesses comuns pela mesma publicação. As RSOs existentes solucionam conflitos ao priorizar o dono da informação, e acabam desfavorecendo os demais envolvidos na mesma. Conflitos podem surgir quando as políticas de privacidade dos usuários não concordam com os usos dos seus dados,

uma vez que cada usuário tem diferentes preferências de privacidade.

No Facebook, usuários podem postar status e anotações, fazer upload de fotos e vídeos em seus próprios espaços, marcar outros usuários no seu conteúdo, e compartilhar com seus amigos. Eles também podem postar no espaço de seus amigos. No entanto, um conteúdo compartilhado é visualizado por vários usuários, podendo originar questões de conflito de privacidade. Estas questões estão relacionadas com a disseminação dos dados entre outros usuários, e ao descontrole sobre estes dados.

Na literatura, foram encontradas propostas para equacionar conflitos em forma de estratégia. A estratégia “Negar” foi proposta por [AmirH, HamidR and Frank 2007]. A aplicação desta estratégia no contexto das RSOs, sempre prevalece o negar se, pelo menos, um dos usuários negar a publicação da imagem. Já, a estratégia de [Yamada, Kim and Perrig [2012] privilegia a decisão da “Maioria” sobre controle de acesso. Assim, esta estratégia adaptada ao mesmo cenário de compartilhamento, é resolvido pela vontade da maioria. A estratégia proposta Li (2013) para tomada de decisão em um jogo gráfico que através da topologia social é feito um cálculo de distância de usuários para desta forma definir o detentor dos direitos dos recursos. Esta estratégia, que por sua vez, não mostra ser a mais adequada para RSOs, pois, dá somente o direito do recurso para um único usuário. Finalmente, Marin (2014) propõem a estratégia que usa o conceito de equidade buscando uma solução mais justa e imparcial respeitando todos os usuários. Nessa estratégia, os usuários envolvidos têm suas políticas de privacidade aplicadas ou violadas se estiverem na mesma proporção em relação às interações passadas.

2.5 Compreensão do Efeito do Uso de TAGs no Facebook

A Figura 1 considera o cenário onde quatro usuários (Editor, Helô, Lú e o Disseminador) interagem no Facebook.

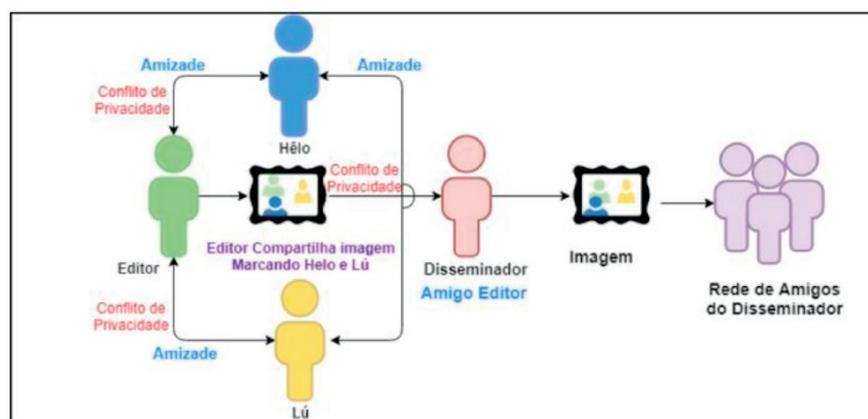


Figura 1. Casos de conflito de privacidade no Facebook - inserindo marcação.

O Editor marca seus amigos Helô e Lú que recebem a notificação, com a mensagem: “Editor marcou vocês em uma publicação”. Porém, a imagem já aparece em todas as

Timeline com a opção de remover a marcação. A remoção da marcação não impede que a imagem continue na *Timeline* do Editor e Helô e Lú ainda passam a não serem identificadas por TAG. Os amigos do Editor que não são comuns a Helô ou Lú, como o Disseminador, poderá ver e comentar esta publicação e ainda caso a TAG seja removida da imagem, ficando somente a do Editor, o Disseminador poderá compartilhar esta foto e expor os demais coautores da foto. Quando um coautor da imagem remove sua TAG, o Editor fica impedido de marcá-lo novamente. Contudo, a ela continuará visível, para todos da rede do Editor e todos os demais coautores com TAG.

3 | TRABALHOS CORRELATOS

Foi proposto, por Dos Santos, Pereira e Feitosa (2017), um estudo, para entender como os usuários percebem privacidade digital e como definem seus limites de relacionamento e lidam com sua própria privacidade na RSO. Para isso foi feita uma pesquisa a fim de levantar algumas hipóteses. Torres e O'Brien. (2012) analisaram as percepções de privacidade on-line dos usuários do Facebook em um contexto de rede social para as questões de privacidade e examina a influência dessa consciência sobre o comportamento. Para isso foi realizado um estudo de caso a fim de descobrir o nível de consciência dos usuários em relação os riscos de privacidade online.

Já Zainab e Khan (2012), realizaram uma pesquisa com estudantes de uma universidade a fim de entender se os participantes sabem utilizar a política de privacidade do Facebook. A política de privacidade foi declarada complexa e de difícil compreensão, e mesmo entre quem declara entender, se mostra pouco consciente do seu efeito. Williams, Agarwal e Wigand (2015) realizaram uma pesquisa focada nas políticas de privacidade online, em março de 2014, com 175 pessoas, para determinar a frequência com a qual os usuários leem as políticas de privacidade e entender o que os levam a não ler, bem como suas atitudes quando adquirem conhecimento das políticas de privacidade.

4 | DESCRIÇÃO DA CONDUÇÃO DO TRABALHO

Nesta seção, descreve-se como este trabalho foi desenvolvido. São apresentadas a seguir, as três principais etapas.

4.1 Levantamento bibliográfico

Utilizando as expressões “*Conflict in online sociais networks*”, “*Conflicts photos using TAGs*” e “*perception of privacy in online social networks*” foram encontrados 21 trabalhos recentes e observou-se que o termo “RSO” é o mais usado para as redes sociais digitais.

4.2 Entendimento do efeito do uso de TAG nas imagens do Facebook

A fim de entender as lacunas e evidenciar conflitos de privacidade no compartilhamento de uma foto com coautores, foi criado cenários de compartilhamento de imagens no Facebook, com usuário com diferentes configurações de privacidade realizado vários testes de uso de TAG ficando clara a presença de conflito.

4.3 Levantamento da percepção dos usuários sobre os controles de privacidade

Utilizando a metodologia Survey, foi realizada uma pesquisa por questionário online disponível em: (<https://docs.google.com/uc?export=download&id=1K0-mm4JXHAaBEdkxxM1ylwRg9IYkfu9>). O uso Google *Forms* permitiu uma disseminação do questionário em aplicativos. O questionário foi composto de 20 perguntas organizadas em três grupos: (1) Quanto ao perfil – Caracterizar o perfil dos participantes; (2) Quanto às funções de privacidade nas RSO - Estabelecer o grau de entendimento dos participantes quanto às regras de privacidade dos aplicativos; e (3) Quanto ao grau de entendimento sobre conflitos de interesse - Estabelecer o cenário de compartilhamento usando TAG.

No primeiro grupo de questões, obtive dos participantes informações de escolaridade, sexo, faixa etária e Rede Social que mais usa. O segundo grupo visa estabelecer se os usuários sabiam utilizar os controles existentes e se leram a política de privacidade, levanta-se informações sobre o uso e o entendimento dos controles de privacidades disponibilizadas pelas RSOs. Por fim, o terceiro grupo de perguntas visa revelar as percepções de conflito de privacidade e o entendimento do efeito do compartilhamento não desejado de uma imagem com TAG. Para análise dos questionários realizou-se uma análise qualitativa sobre o perfil dos participantes e a tendência de como gerenciam conflitos de privacidade nas RSO.

5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

O questionário foi respondido por 129 pessoas, porém utilizados somente as 99 respostas das pessoas que responderam todo o questionário. O período da coleta de dados foi de outubro de 2018 até fevereiro de 2019. As pessoas que participaram da pesquisa estavam restritas ao ambiente universitário do pesquisador e relacionamentos sociais próximos. Possivelmente, porque não apresentam conhecimento da função “TAG”, a maioria das questões não respondidas estão relacionadas ao seu uso.

A. Quanto ao Perfil do Público Participante

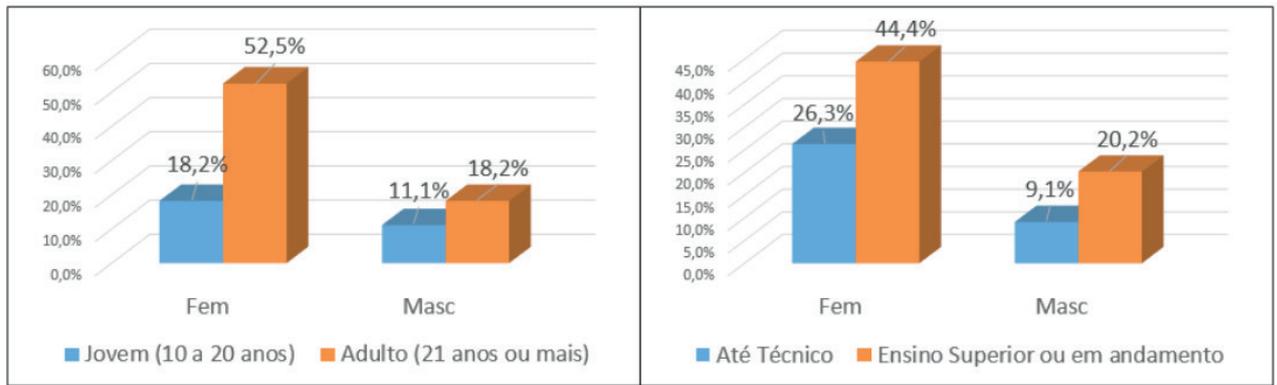


Figura 2. Perfil do público participante por faixa etária, sexo e escolaridade.

A maioria é do sexo feminino, adultos com idade de 21 anos ou mais. Os gráficos da Figura 2 evidenciam que dos 99 participantes, 52% são mulheres adultas. E que 44,4% das mulheres e 20,2% dos homens possuem ensino superior ou estão cursando, presumindo-se que possuem requisito para compreender as funcionalidades de uma RSO.

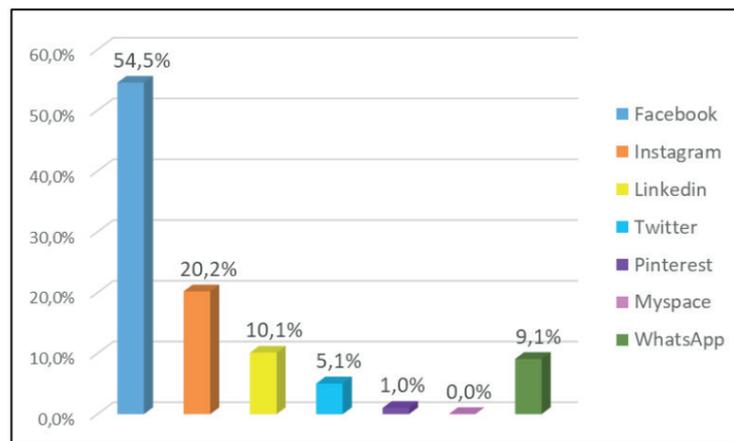


Figura 3. Redes sociais mais usadas.

Quanto ao uso de RSOs utilizada, o questionário sugeriu quatro RSOs: *Facebook*, *Myspace*, *Twitter* e *LinkedIn*, porém, incluiu opção para que o participante relacionasse RSOs diferentes. O Instagram, o *WhatsApp* e o *Pinterest* foram apontados. Na Figura 3 o gráfico apresenta a preferência de RSOs utilizada. Observa-se que o Facebook representa 54.5% da amostra, o que corrobora com o foco da pesquisa que foi em relação ao uso de “TAGs” no Facebook.

B. Quanto aos Controles de Privacidade nas RSOs

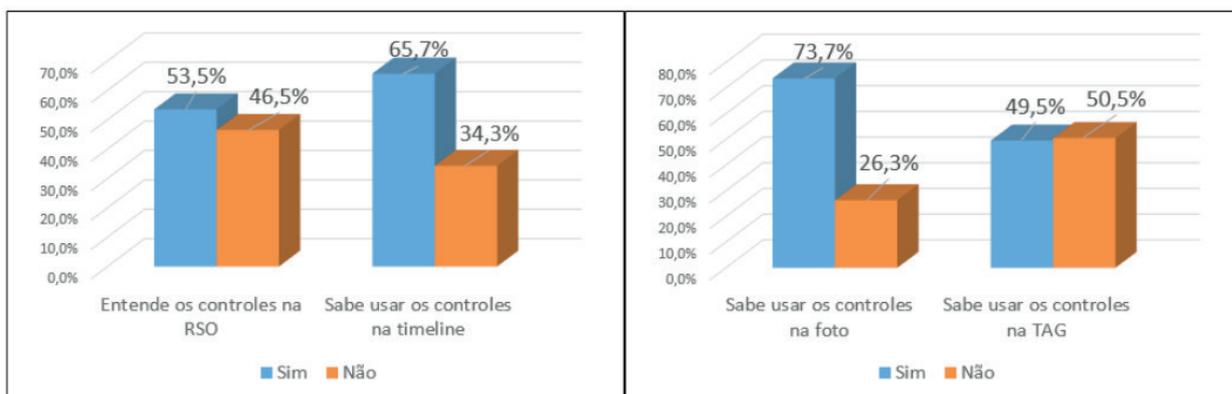


Figura 4. Utilidades dos controles de privacidade nas RSOs.

A Figura 4 ilustra que apesar de apenas 53.5% dos participantes afirmarem entender o efeito da aplicação dos controles de privacidade, 65.7% afirmam saber usar na sua *timeline* e 73,7% afirmam saber usá-los em fotos o que deixa em aberto se de fato compreendem o efeito do uso desses controles. No entanto, a convergência mais próxima entre as respostas pode ser observada entre as afirmações de 53,5% que entende os controles e os 49,5% que afirmam saber usar os controles com a “TAG”.

Quanto a ter lido a política de privacidade, a Figura 5 mostra que 74,7% dos participantes não leram e logo não sabem sobre seu conteúdo. No entanto, também 63,6% não acreditam estar protegido só pelo fato de existir a política de privacidade. Comparando este resultado com as pesquisas realizadas por [Zainab and Mamuna 2012] e [Williams, Agarwal and Wigand 2015] em relação ao gerenciamento de privacidade no Facebook observou-se que não houve significativa mudança neste cenário. [Zainab and Mamuna 2012] obteve que 87.9% das pessoas que não leram as políticas de privacidades enquanto [Williams, Agarwal and Wigand 2015] obteve a porcentagem de 70%.

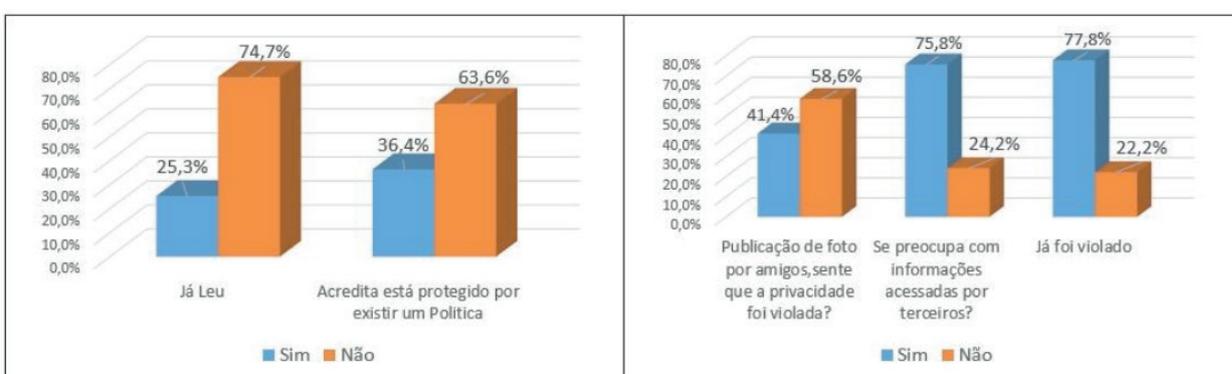


Figura 5. Políticas e Violação de Privacidade.

Quanto à violação da privacidade, 58.6% dos participantes respondeu que não sente que sua privacidade foi violada quando um amigo publica uma foto sua. Nota-se que a maioria, 77.8% dos participantes nunca sofreu violação de privacidade, e 75.8% dos

participantes dizem estar preocupados com o fato de suas informações serem acessadas por terceiros.

C. Quanto ao Grau de Entendimento sobre Conflitos de Interesse - Perfil com Privacidade x Público com Uso de TAG.

Quanto recusar uma “TAG”, 70.7% afirmaram positivamente e a já ter removido uma TAG, 94,9% afirmaram saber remover e já ter removido, como mostra a Figura 6. Em relação há recusar uma TAG, a pesquisa de Besmer (2010) afirma que a grande maioria dos usuários permite o seu uso, pois não se sente confortável em recusar o pedido. O que contrasta com o resultado obtido nesta pesquisa onde, 70.7% não veem problema em recusar quando é do seu interesse. Tal diferença entre estes resultados leva ao entendimento de que há uma significativa mudança no comportamento dos usuários.

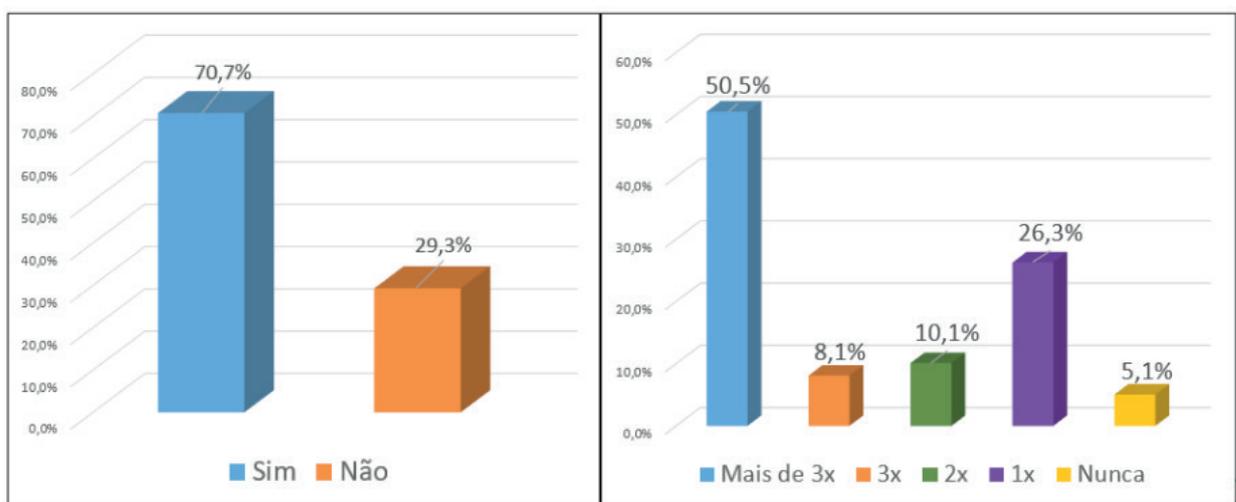


Figura 6. TAG (Marcação) recusar TAG e remover TAG.

Na Figura 7 tem-se que quando apresentado a um autor a situação hipotética de uma consulta prévia aos coautores sobre a publicação de uma foto, qual seria a sua decisão se: somente um negasse ou se a maioria negasse. Obteve-se 89.9% afirmando que não postariam a foto se somente um envolvido não desejasse, no entanto, 90.9% não publicaria a foto caso a maioria dos coautores não desejasse. Os resultados demonstram que os usuários estão conscientes do efeito de uma postagem indesejada. Assim, se fossem adotadas as estratégias de “**Negar**” e da “**Maioria**”, a margem de conflitos de privacidade seria de 10% das situações.

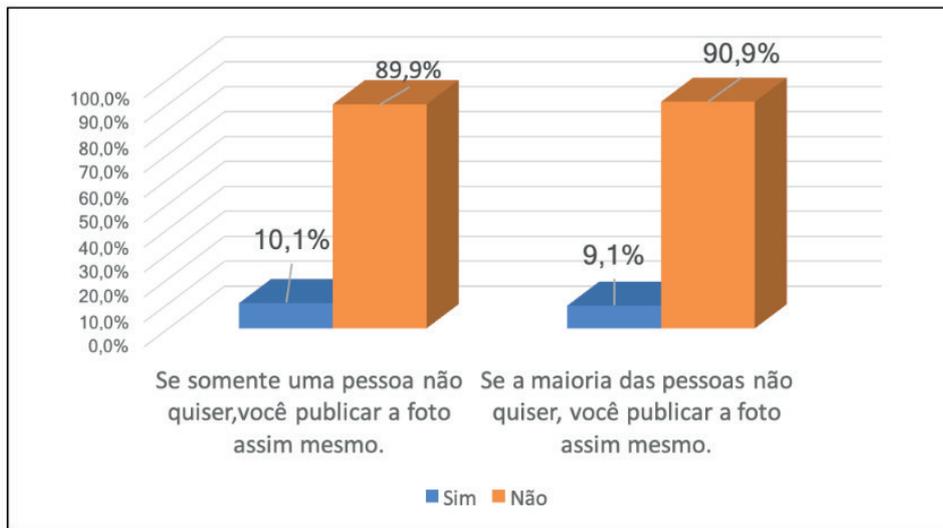


Figura 7. Conflitos de privacidade das estratégias negar e maioria.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

As políticas RSOs existentes para o controle de privacidade se mostra, ineficientes, pois se beneficia o dono da publicação em detrimento dos demais usuários envolvidos. Na análise das percepções dos usuários, proposta neste trabalho, sobre os conflitos de privacidade obteve-se, na análise qualitativa sobre as percepções dos usuários proposta neste trabalho sobre conflitos de privacidade, obteve-se que os usuários apesar de não lerem as políticas de privacidade existentes, afirmam estar preocupados com a privacidade de suas informações. Notou-se que apesar de não compreenderem, eles usam os controles de privacidade disponibilizados pelas RSOs. Assim como, a grande maioria dos usuários afirma respeitar a vontade dos coautores das imagens. Se as RSOs concedessem aos autores e coautores das fotos a possibilidade de interagir sobre os recursos e preferências, na maioria dos casos não existiriam conflitos.

Especialmente no uso de TAG, a maioria dos usuários afirma respeitar as estratégias de negação, nestes casos, o conflito se seria reduzido a somente 10% das situações. A pesquisa apresenta limitação em relação ao público participante uma vez que pessoas com educação básica não foram contempladas. Este trabalho buscou entender a percepção do usuário de RSO, sobre conflitos de privacidade. Acredita-se que estes resultados podem fornecer informações relevantes para se propor ou aplicar uma estratégia de resolução de conflitos realista incluindo as demais RSOs.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CTI, IFSP e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- AMIRH, C., HAMIDR C. and FRANKWM, T. (2007) A unified conflict resolution algorithm. In **Secure Data Management**, volume 4721 of **Lecture Notes in Computer Science**, pages 1-17. Springer Berlin Heidelberg.
- ANTHONY SAMY, P.; RASHID, A.; GREENWOOD, P. **Do the privacy policies reflect the privacy controls on social networks?** In: SocialCom/PASSAT. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1155 –1158.
- BRASIL. **Marco Civil da Internet**. Lei 12.964/14. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/L13709.htm> Acesso em: 8 novembro. 2018.
- BESMER, Andrew; RICHTER LIPFORD, Heather. Moving beyond untagging: photo privacy in a tagged world. In: **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. ACM, 2010. p. 1563-1572.
- DOS SANTOS, Ingrid L.; PEREIRA, Karla S.; FEITOSA, Eduardo L. **Investigando as Percepções de Privacidade do Usuário em Redes Sociais Online**. XVII Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais – SBSEG. Anais, p737-746,2017.
- ELLISON, N. B.; Boyd, D. Sociality through social network sites. In **The Oxford Handbook of Internet Studies**, pages 151-172. Oxford University Press, 2013.
- HU, Hongxin; AHN, Gail-Joon; JORGENSEN, Jan. Detecting and resolving privacy conflicts for collaborative data sharing in online social networks. In: **Proceedings of the 27th Annual Computer Security Applications Conference**. ACM, 2011.
- KLEMPERER, P.; Liang, Y.; Mazurek, M.; Sleeper, M.; Ur, B.; Bauer, Cranor, L. F.; Gupta, N.; Reiter, M. Tag, you can see it!: using tags for access control in photo sharing. In **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**, CHI'12, p. 377-386, New York, NY, USA, 2012.ACM.
- LI, Zhuoshu; CHANG, Yu-Han; MAHESWARAN, Rajiv. **Graph formation effects on social welfare and inequality in a networked resource game**. In: International Conference on Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling, and Prediction. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 221-230.
- MARIN, Regina; PIOLLE, Guillaume; BIDAN, Christophe. **Equity-preserving management of privacy conflicts in social network systems**. In: The Sixth ASE International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT), Cambridge, MA, USA. 2014.
- TORRES, Ann M.; O'BRIEN, Deirdre. Social networking and online privacy: Facebook users' perceptions. **Irish Journal of Management**, 2012.
- WILLIAMS, Therese L.; AGARWAL, Nitin; WIGAND, Rolf T. **Protecting Private Information: Current Attitudes Concerning Privacy Policies**. The Sixth ASE International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT), Cambridge, MA, USA. 2015.
- XU, L.; JIANG, C.; HE, N.; HAN, Z.; BENSLIMANE, A. Trust-based collaborative privacy management in online social networks. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, v. 14, n. 1, 2019.
- ZAINAB, Asif; MAMUNA, K. Users' Perceptions on Facebook's Privacy Policies. **ARPJ Journal of Systems and Software**, v. 2, n. 3, p 119-125, 2012.
- YAMADA, Akira; KIM, Tiffany Hyun-Jin; PERRIG, Adrian. Exploiting privacy policy conflicts in online social networks. **CMU-CyLab-12-005**, 2012.

MODELAGEM DE PROBLEMA ELETROSTÁTICO UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Data de aceite: 01/06/2020

Julia Grasiela Busarello Wolff

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.
Engenharia Elétrica, Joinville.
wolff1980@gmail.com

Pedro Bertemes Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.
Engenharia Elétrica, Joinville.

RESUMO: Na modelagem de problemas eletromagnéticos podem ser utilizados dois métodos denominados analítico e numérico. O método analítico fornece uma solução exata do problema e é utilizado somente em problemas com geometrias as quais permitam a fácil suposição de condições de contorno. Já o método numérico fornece uma solução aproximada do problema e, geralmente, é desenvolvido computacionalmente, devido ao extenso número de equações a serem solucionadas. Alguns exemplos de métodos numéricos são: método das diferenças finitas (MDF), método dos momentos (MOM), modelagem por linhas de transmissão (TLM), método dos elementos finitos (FEM) etc. Nesse trabalho foi utilizado o software FEMM 4.2, que trabalha com o método dos elementos finitos

(FEM). O FEM é uma variação do método de Ritz (variacional) para modelagem de um problema eletrostático. O método de Ritz resume-se em obter a capacitância em um dispositivo capacitor, com secção transversal quadrada e grafica as superfícies equipotenciais. O software FEMM 4.2® foi desenvolvido por David Meeker. Este método utilizado nesse trabalho forneceu bons resultados em baixas frequências em comparação com outros resultados já publicados.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos Finitos, Problema Eletrostático, FEMM 4.2, Capacitância

ABSTRACT: In the modeling of electromagnetic problems two methods called analytical and numerical are widely used. The analytical method selects an exact solution of the problem and uses only problems with geometries, as they allow an easy assumption of the boundary conditions. The numerical method is an approximate solution to the problem and is usually computationally developed due to the large number of equations to be solved. Some examples of numerical methods are: finite difference method (MDF), moment method (MOM), modeling by transmission lines, finite element method (FEM), etc. In this work, the software FEMM 4.2 was used, which works with

the finite element method (FEM). FEM is a variation of the Ritz method for modeling an electrostatic problem. The Ritz method is summarized in obtaining a capacitance in a device capacitor, having a square and graphical cross section as equipotential surfaces. The FEMM 4.2® software was developed by David Meeker. This method provided good results at low frequencies into comparison to others methods already published.

KEYWORDS: Finite Elements, Electrostatic Problem, FEMM 4.2, Capacitance

1 | INTRODUÇÃO

1.1 Introdução ao Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (FEM) foi originado no campo da análise estrutural para resolver problemas mecânicos. Apesar do seu tratamento matemático inicial, que foi fornecido por Courant [1], em 1943, o FEM não foi aplicado à problemas eletromagnéticos antes de 1968. Desde então, o método tem sido empregado em diversas áreas, tais como, problemas de guias de onda, máquinas elétricas, dispositivos semicondutores, microfitas e absorção da radiação eletromagnética por organismos biológicos. O FEM foi aplicado a problemas de eletromagnetismo, em 1968, por Silvester [2]. O método das diferenças finitas (MDF) e o método dos momentos (MOM) são conceitualmente simples e menos complexos para implementação computacional do que o método dos elementos finitos (FEM) [3]. Entretanto, o FEM é uma técnica numérica mais versátil e potente para manipulação de problemas envolvendo geometrias complexas e meios não homogêneos. A generalidade sistemática do método torna possível a construção de programas de computador de propósitos gerais para resolver um extenso conjunto de problemas. Conseqüentemente, os programas desenvolvidos nesse trabalho, em particular, foram aplicados com bons resultados, para resolver problemas, de campos diferentes, com pequena ou nenhuma modificação [2].

A análise de elementos finitos para qualquer problema eletromagnético envolve quatro passos [3]:

- Discretização da região de solução em um número finito de sub-regiões ou elementos,
- Derivação das equações dominantes para um elemento típico,
- Montagem dos elementos na região de solução, e,
- Resolução do sistema de equações.

A discretização num meio contínuo envolve dividir a região de solução em subdomínios, chamado elementos. A Fig. 1 mostra alguns elementos típicos para problemas de uma, duas ou três dimensões.

1.2 Solução da Equação de Laplace

Uma aplicação do FEM para problemas eletrostáticos, permite-nos aplicar os quatro passos mencionados acima para resolver a equação de Laplace, $\nabla^2 V = 0$. A título de ilustração, seguiremos estritamente os quatro passos mencionados acima.

1.2.1 Discretização de Elementos Finitos

Para encontrar a distribuição de potencial $V(x, y)$ para a região de solução em duas dimensões mostrada na Fig. 2(a), foi dividida a região em um número de elementos finitos tal como ilustrado na Fig. 2(b).

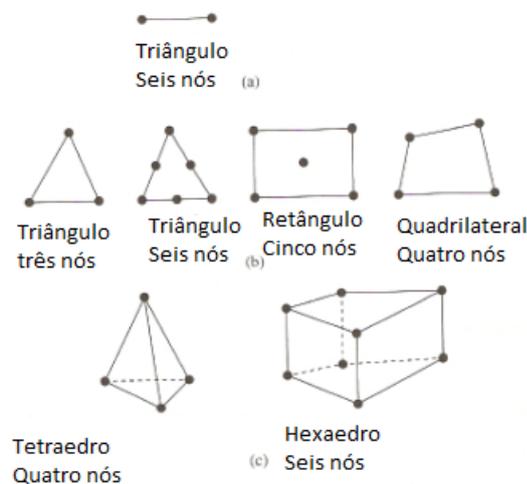


Fig. 1. Elementos finitos típicos: (a) Uma dimensão, (b) Duas dimensões, (c) três dimensões. [9]

Na Fig. 2(b), a região de solução é subdividida em nove elementos finitos não-sobrepostos; elementos 6, 8 e 9 são quadriláteros de quatro nós, enquanto que os outros elementos são triângulos de três nós. Em situações práticas, entretanto, é preferível, para facilitar o cálculo, ter-se elementos do mesmo tipo inteiramente na região. Ou seja, na Fig. 2(b), nós dividiremos cada quadrilátero em dois triângulos então teremos doze elementos triangulares ao todo. A subdivisão da região de solução em elementos é comumente feita manualmente, mas em situações onde um grande número de elementos é necessário, esquemas automáticos são usados.

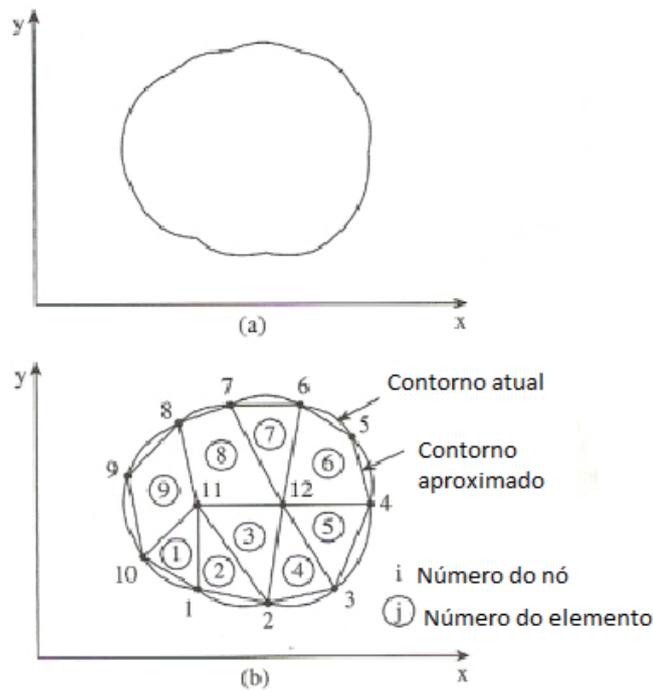


Fig. 2. (a) A região de solução; (b) Discretização da região em elementos finitos. [9]

Nós obtemos uma aproximação para o *potencial* V_e dentro de um elemento e e então correlacionar a distribuição de potencial em vários elementos tal que o potencial é contínuo através dos limites entre os elementos. A solução aproximada para a região total é

$$V(x, y) \approx \sum_{e=1}^N V_e(x, y) \quad (1.1)$$

onde N é o número de elementos triangulares nos quais a região de solução é dividida. A forma mais comum de aproximação para V_e dentro de um elemento é a aproximação polinomial, isto é:

$$V_e(x, y) = a + bx + cy \quad (1.2)$$

para um elemento triangular e,

$$V_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (1.3)$$

para um elemento quadrilátero. As constantes a , b , c e d estão sendo determinadas. O potencial V_e é não nulo dentro de um elemento e mas é zero do lado de fora de e . Levando em conta o fato de que os elementos quadriláteros não se adaptam ao limite curvado tão facilmente quanto os elementos triangulares, nós preferimos utilizar elementos triangulares em nossa análise. Observe que nossa suposição de variação de potencial linear dentro do elemento triangular como na Eq. (1.2) é a mesma conforme suposta para

o campo elétrico uniforme dentro do elemento, ou seja,

$$\vec{E}_e = -\nabla V_e = -(ba_x + ca_y) \quad (1.4)$$

1.2.2 Equações que regem os Elementos

Considere um elemento triangular típico conforme mostrado na Fig. 3. O potencial V_{e1} , V_{e2} e V_{e3} nos nós 1, 2 e 3, respectivamente, são obtidos usando Eq. (1.2), ou seja,

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Os coeficientes a , b e c são determinados da Eq. (1.5) como:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Substituindo essas equações na Eq. (1.2) obtém-se:

$$V_e = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} (x_2y_3 - x_3y_2) & (x_3y_1 - x_1y_3) & (x_1y_2 - x_2y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix}$$

ou,

$$V_e = \sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) V_{ei} \quad (1.7)$$

onde:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2A} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y], \quad (1.8a)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2A} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y], \quad (1.8b)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2A} [(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y], \quad (1.8c)$$

E, A é a área do elemento e , ou seja,

$$2A = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_2 y_3 - x_3 y_2)$$

Ou,

$$A = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (1.9)$$

O valor de A é positivo se os nós são numerados no sentido anti-horário (partindo de qualquer nó) conforme mostrado pela seta na Fig. 3.

Observe que a Eq. (1.7) dá o potencial em qualquer ponto (x, y) dentro do elemento fornecido pelos potenciais nos vértices são conhecidos.

Essa é uma análise de diferenças finitas distinta, onde o potencial é conhecido nos pontos da malha somente. Além disso, observe que as a_i são funções de interpolação lineares.

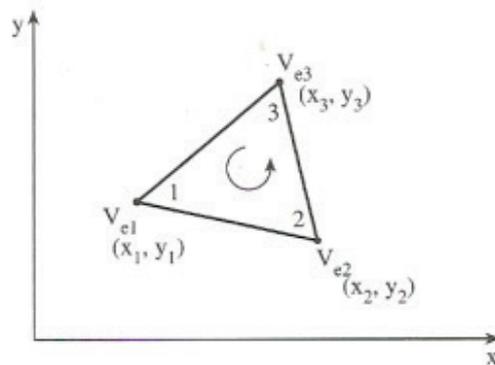


Fig. 3. Elemento triangular típico; nó local numerado 1 – 2 - 3 deve proceder o sentido anti-horário conforme indicado pela seta. [9]

Elas são chamadas de *funções de forma do elemento* e elas têm as seguintes propriedades [4]:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (1.10a)$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (1.10b)$$

As funções de forma a_1, a_2 e a_3 são ilustradas na Fig. 4.

Os funcionais correspondentes à Equação de Laplace, $\nabla^2 V = 0$ são dados por:

$$W_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\vec{E}_e|^2 dS = \frac{1}{2} \int \varepsilon |\nabla V_e|^2 dS \quad (1.11)$$

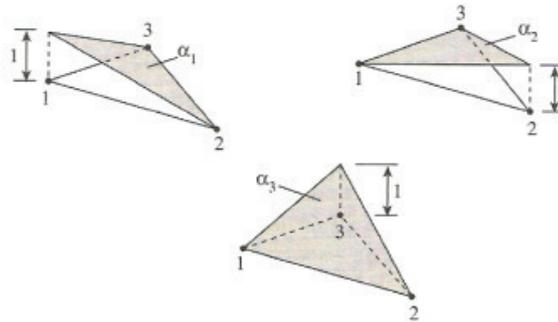


Fig. 4. Funções de forma a_1 , a_2 e a_3 para um elemento triangular. [9]

(Fisicamente, o funcional W_e é a energia por unidade de comprimento associada ao elemento e .) da Eq. (1.7),

$$V_e = \sum_{i=1}^3 V_{ei} a_i \quad (1.12)$$

Substituindo a Eq. (1.12) na Eq. (1.11) obtém-se:

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon V_{ei} \left[\int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS \right] V_{ej} \quad (1.13)$$

Se definirmos o termo entre colchetes como:

$$C_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS, \quad (1.14)$$

Pode-se escrever a Eq. (1.13) na forma de matriz conforme segue:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot [V_e]^t \cdot [C^{(e)}] \cdot [V_e] \quad (1.15)$$

onde o t sobrescrito significa a transposta da matriz,

$$[V_e] = \begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad (1.16a)$$

E,

$$\begin{bmatrix} C_1^{(e)} \\ C_2^{(e)} \\ C_3^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1^{(e)} & C_2^{(e)} & C_3^{(e)} \\ C_2^{(e)} & C_2^{(e)} & C_3^{(e)} \\ C_3^{(e)} & C_3^{(e)} & C_3^{(e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix} \quad (1.16b)$$

A matriz $\begin{bmatrix} C_1^{(e)} \\ C_2^{(e)} \\ C_3^{(e)} \end{bmatrix}$ é comumente chamada de *matriz de coeficiente de elemento*. O elemento $C_{ij}^{(e)}$ da matriz de coeficiente pode ser considerado como um acoplamento entre os nós i e j ; seus valores são obtidos das Eqs. (1.8) e (1.14). Por exemplo:

$$\begin{aligned} C_{12}^{(e)} &= \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j dS = \\ &= \frac{1}{4A^2} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \int dS = \\ &= \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3)] \quad (1.17a) \end{aligned}$$

Da mesma forma,

$$C_{13}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1)] \quad (1.17b)$$

$$C_{23}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1)] \quad (1.17c)$$

$$C_{11}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_2 - y_3)^2 + (x_3 - x_2)^2] \quad (1.17d)$$

$$C_{22}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_3 - y_1)^2 + (x_1 - x_3)^2] \quad (1.17e)$$

$$C_{33}^{(e)} = \frac{1}{4A} [(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2] \quad (1.17f)$$

Ainda,

$$C_{21}^{(e)} = C_{12}^{(e)}, C_{31}^{(e)} = C_{13}^{(e)}, C_{32}^{(e)} = C_{23}^{(e)} \quad (1.18)$$

1.2.3 Montagem de todos os Elementos

Considerando um elemento típico, o próximo passo é montar tais elementos na região de solução. A energia associada com a montagem dos elementos é:

$$W = \sum_{e=1}^N W_e = \frac{1}{2} \varepsilon [V]^t [C][V] \quad (1.19)$$

Onde,

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \quad (1.20)$$

n é o número de nós, N é o número de elementos, e $[C]$ é chamado de *matriz dos coeficientes global* ou *total*, a qual é uma montagem das matrizes de coeficientes de elementos individuais. Observe que para obter a Eq. (1.19), nós consideramos que a região de solução total é homogênea e que e é constante. Para uma região de solução não homogênea conforme mostrada na Fig. 5, por exemplo, a região é discretizada tal que cada elemento finito é homogêneo. Nesse caso, a Eq. (1.11) ainda se mantém, mas a Eq. (1.19) não se aplica desde que $e (= e_r, e_o)$ ou simplesmente e_r , varia de elemento para elemento. Para aplicar a Eq. (1.19), nós devemos substituir e por e_o e multiplicar o integrando na Eq. (1.14) por e_r .

O processo pelo qual matrizes de coeficiente de elemento individual são montadas para se obter a matriz de coeficiente global é melhor ilustrado com um exemplo.

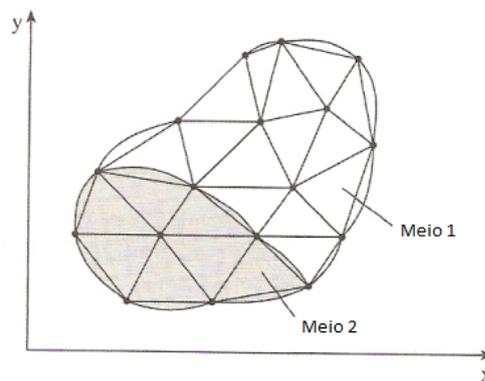


Fig. 5. Discretização de uma região de solução não homogênea. [9]

Considere a malha de elemento finito consistindo de três elementos finitos conforme mostrada na Fig. 6.

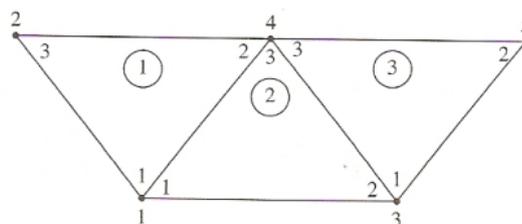


Figura 6. Montagem de três elementos; $i - j - k$ correspondentes à numeração local (1-2-3) do elemento na Fig. 3. [9]

Observe as numerações da malha. As numerações dos nós 1, 2, 3, 4 e 5, são

chamadas de numeração *global*. A numeração $i - j - k$ é denominada numeração *local*, e corresponde com 1 - 2 - 3 do elemento na Fig. 3. Por exemplo, para o elemento 3 na Fig. 6, a numeração global 3 - 4 - 5 corresponde a numeração local 1 - 2 - 3 do elemento na Fig. 3. (Observe que a numeração local deve estar em seqüência no sentido anti-horário partindo de qualquer nó do elemento). Para o elemento 3, podemos escolher 4 - 3 - 5 ao invés de 3 - 5 - 4 para corresponder com 1 - 2 - 3 do elemento na Fig. 3. Então, a numeração na Fig. 6 não é única. Mas qualquer numeração é usada, a matriz de coeficiente global continua a mesma. Considerando a numeração própria na Fig. 6, a matriz de coeficiente global esperada deve ter a seguinte forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

a qual é uma matriz 5 x 5 já que cinco nós ($n = 5$) estão envolvidos. Novamente, C_j é o acoplamento entre os nós i e j . Nós obtemos C_j pelo fato de que a distribuição de potencial deve ser contínua através dos limites inter elementares. A contribuição para a posição i, j em $[C]$ vem de todos os elementos contendo os nós i e j . Por exemplo, na Fig. 6, os elementos 1 e 2 têm o nó 1 em comum, conseqüentemente:

$$C_{11} = C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} \quad (1.22a)$$

O nó 2 pertence ao elemento 1 somente; então:

$$C_{22} = C_{33}^{(1)} \quad (1.22b)$$

O nó 4 pertence aos elementos 1, 2 e 3; conseqüentemente:

$$C_{44} = C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} \quad (1.22c)$$

Os nós 1 e 4 pertencem, simultaneamente, aos elementos 1 e 2; desta forma:

$$C_{14} = C_{41} = C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} \quad (1.22d)$$

Desde que não há acoplamento (ou ligação direta) entre os nós 2 e 3,

$$C_{23} = C_{32} = 0 \quad (1.22e)$$

Continuando desta maneira, nós obtemos todos os termos da matriz de coeficiente global por inspeção da Fig. 6, conforme segue:

$$\begin{bmatrix}
 C_{11}^{(1)} + C_{11}^{(2)} & C_{13}^{(1)} & C_{12}^{(2)} & C_{12}^{(1)} + C_{13}^{(2)} & 0 \\
 C_{31}^{(1)} & C_{33}^{(1)} & 0 & C_{32}^{(1)} & 0 \\
 C_{21}^{(2)} & 0 & C_{22}^{(2)} + C_{11}^{(3)} & C_{23}^{(2)} + C_{13}^{(3)} & C_{12}^{(3)} \\
 C_{21}^{(1)} + C_{31}^{(2)} & C_{23}^{(1)} & C_{32}^{(2)} + C_{31}^{(3)} & C_{22}^{(1)} + C_{33}^{(2)} + C_{33}^{(3)} & C_{32}^{(3)} \\
 0 & 0 & C_{21}^{(3)} & C_{23}^{(3)} & C_{22}^{(3)}
 \end{bmatrix}
 \quad (1.23)$$

Observe que a matriz de coeficientes dos elementos se sobrepõem nos nós divididos pelos elementos e que há 27 termos (9 para cada um dos 3 elementos) na matriz de coeficiente global $[C]$. Observe, ainda, as seguintes propriedades da matriz $[C]$:

- (1) Ela é simétrica ($C_{ij}=C_{ji}$) como a matriz de coeficiente dos elementos.
- (2) Desde que ($C_{ij}=0$) se não há acoplamento existente entre os nós i e j , espera-se que para um grande número de elementos $[C]$ se torna esparsa. A matriz $[C]$ é, ainda, em banda se os nós são cuidadosamente numerados. Isso pode ser mostrado usando a Eq. (1.17), ou seja:

$$\sum_{i=1}^3 C_{ij}^{(e)} = 0 = \sum_{j=1}^3 C_{ij}^{(e)}$$

- (3) Ela é única (singular). Contudo, isso não seja tão óbvio, pode ser mostrado usando a matriz de coeficiente dos elementos da Eq. (1.16b).

2 | JUSTIFICATIVA

Escolheu-se o método dos elementos finitos para a apresentação deste trabalho devido ao fato dele ter se mostrado, ao longo dos anos, como uma ferramenta muito poderosa na resolução de problemas eletrostáticos e pela razão de haver inúmeros softwares já consagrados para a realização do nosso propósito.

Embora o FEM tem suas origens nos anos 40, a sua divulgação no meio científico ocorreu por volta da década de 80, junto com a minimização das estações de trabalho e com o surgimento dos microcomputadores [8].

A solução analítica das equações de Maxwell não são viáveis para sistemas que possuem geometrias complexas, por isso utilizam-se programas numéricos para este fim. No nosso caso, a geometria do problema não é complexa e sua solução analítica já é conhecida na literatura. Porém, queremos demonstrar a eficácia da utilização de um programa desenvolvido com base no MEF, com o intuito de se obter uma aproximação satisfatória para os resultados já conhecidos analiticamente.

O programa de computador utilizado nesse trabalho é o FEMM[®], versão 4.2, desenvolvido por David Meeker [5], o qual fornece bons resultados em baixas frequências, para problemas eletrostáticos e magnetostáticos. No MEF, a maior complexidade se dá na geração da malha a qual foi minimizada e é gerada com sucesso pelo FEMM 4.2,

justificando mais uma vez a sua utilização neste trabalho.

3 | METODOLOGIA

O *Finite Element Method Magnetics* ou simplesmente *FEMM*, como é conhecido, trata de um pacote de programas disponibilizado gratuitamente em página de internet [5], cujo objetivo é resolver numericamente problemas eletrostáticos bidimensionais planos e axissimétricos e problemas magnetostáticos em baixa frequência. As principais vantagens na utilização dessa suíte de programas são [6]:

- a simplicidade na formulação do modelo,
- nível de erro numérico satisfatório para problemas $2D$, e;
- aplicação à problemas práticos com geometrias mais complexas devido a utilização da propriedade de simetria do problema.

Para este estudo, utilizamos a versão 4.2 do FEMM e propomos a análise do problema eletrostático seguinte:

Considerar um capacitor com secção transversal quadrada, conforme mostrado na Fig. 7, sendo o tamanho do quadrado exterior igual a 4 cm e o quadrado interior possuindo 2 cm de tamanho. A geometria se estende para 100 cm na direção entrando na página e o dielétrico entre as placas é o ar.

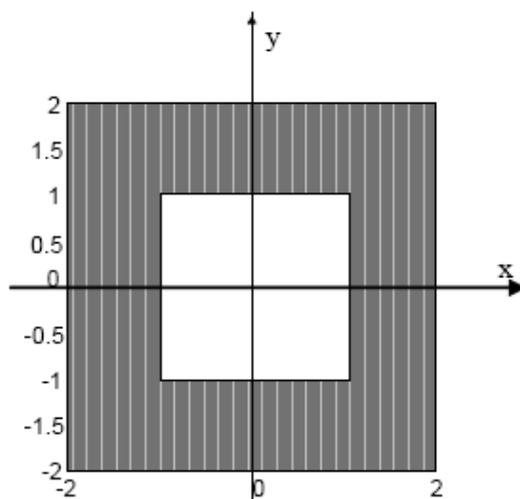


Fig. 7. Capacitor de seção transversal quadrada. [5]

Nós dividimos o trabalho em três etapas; que são:

- construção do problema,
- análise,
- determinação da capacitância.

Devido à simetria, apenas um quarto do dispositivo necessita ser modelado. O

exemplo desse passo pode ser visualizado na Fig. 8; a seguir.

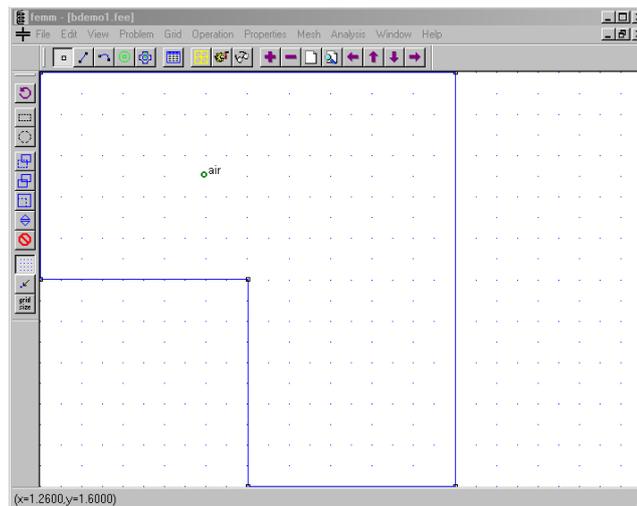


Fig. 8. Exemplo completo no pré-processador eletrostático. [5]

Os passos requeridos para a construção do modelo, são apresentados na seqüência:

Criar o modelo:

Ao abrir o programa FEMM 4.2 aparece uma janela para escolha do tipo de problema a ser simulado, foi selecionado problema eletrostático e criado um novo modelo. Em seguida, foram selecionados os nós na barra de ferramentas e alocados seis nós nos vértices de uma caixa. Selecionando o comando linha pode-se ligar os vértices da caixa a fim de formar um quadrado.

Adicionar materiais ao modelo proposto:

No menu principal seleciona-se “*Properties*” e “*Materials*” para adicionar um novo material ao modelo, nesse caso, o ar. Por definição, a permissividade do novo material é

Definir os materiais para cada região do modelo:

Clicando em “*Block Labels*” na barra de ferramentas e alocando esse comando no meio do domínio da solução define-se o material para a região entre o quadrado interno e o externo. Selecionando o comando com o botão direito e pressionando a tecla espaço, abre uma janela que contém as propriedades referentes ao tipo de bloco etc. Escolher o ar, desmarcar a opção “*Let Triangle*” e escolher a opção “*Mesh Size*” com o tamanho dos elementos de 0,025, para essa malha. O gerador de malha, então, preenche a região com vários triângulos equiláteros muito próximos uns dos outros, nos quais os lados possuem, aproximadamente, o comprimento especificado de 0,025.

Definir as tensões nos condutores:

Para a definição dos valores das tensões nos condutores, nós selecionamos o comando “*Properties*” e “*Conductors*” e clicamos no botão “*Add Property*”. Na seqüência,

substituiu-se o nome “*New Conductory*” com “zero”. Foi selecionado “*Prescribed Voltage*” e entrou-se com o valor 0 para o potencial., seguindo a condição de contorno de Dirichlet.

Repetimos o mesmo processo acima, porém, entrou-se com o novo valor de tensão 1. Na barra de ferramentas, foi escolhido o comando “*lines*” e clicou-se com o botão direito em cada um dos dois segmentos ao longo do condutor interno. Agora, então, foi pressionada a barra de espaços a fim de retornar a janela “*Segment Properties*”. Da caixa com a descrição “*In Conductor*” mudou-se a seleção de “<None>” para “1” e repetiu-se o mesmo processo para o condutor externo, mas modificamos o tipo de condutor para “0”.

Conjunto de características do problema:

No menu principal foi escolhido “*Problem*” onde apareceu a caixa de diálogo a fim de escolher o tipo de problema, o qual foi definido como plano por “*planar*”, já o conjunto de unidades de comprimento selecionado foi “*centimeters*” e o parâmetro de profundidade foi de 100. A precisão de solução padrão do programa é de 10^{-8} e geralmente não há necessidade de modificá-la. O programa disponibiliza, ainda, uma caixa de Comentários, caso se faça necessário; porém ela não foi utilizada por nós neste problema.

Gerar uma malha e rodar o FEA:

Após ser salvo o arquivo, clicamos no botão com malha amarela na barra de ferramentas para geração da malha triangular no modelo. Em seguida, clicou-se no botão “*turn the crank*” que rodou o algoritmo *FEA* para o modelo. O nosso problema rodou em menos de um segundo, mas o tempo de processamento pode ser maior dependendo da velocidade de *clock* do microcomputador utilizado.

Apresentar os resultados:

Este passo está completamente descrito na seção seguinte, ou seja, na Seção V.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse artigo, trabalhamos com o método dos elementos finitos (FEM) que é uma variação do método de Ritz (variacional) para a modelagem de um problema eletrostático que se resume em obter a capacitância num dispositivo capacitor com secção transversal quadrada e ilustrar as superfícies eqüipotenciais, utilizando o programa FEMM 4.2; conforme ilustrado na Fig. 9.

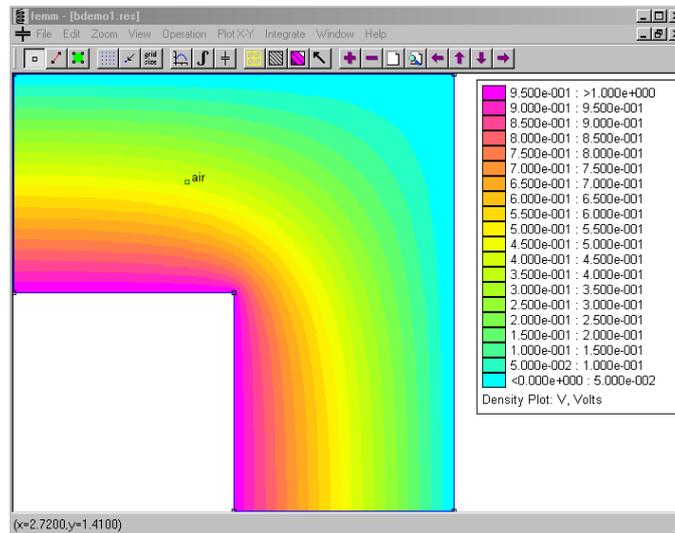


Fig. 9. Solução do exemplo eletrostático apresentado para o capacitor. [5]

A apresentação dos resultados no programa de computador é feita clicando no ícone “glasses” que abre a solução numa janela do pós-processador. A carga em cada condutor poderá, então, ser determinada selecionando “View” e “Conductor Props off” no menu principal do pós-processador. Aparecerá, então, uma caixa de diálogo mostrando a tensão e a carga total para cada condutor definido. Para o condutor “1”, a carga informada foi de $2,26835 \times 10^{-11}$ Coulombs [C]. Partindo da definição que nos diz que a carga total do sistema é igual ao produto da tensão (d.d.p.) e da capacitância, concluímos que somente um quarto da geometria total do sistema foi modelada, então, a carga total será de $9,0734 \times 10^{-11}$ Coulombs. Nesse caso a tenção foi suposta como sendo de 1V, implicando no seguinte valor de capacitância total para o sistema apresentado: 90,734 pF.

5 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma revisão sucinta sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF), baseando-se num exemplo de aplicação ao eletromagnetismo simulado no FEMM 4.2. Partindo do exemplo exposto que se refere a um problema eletrostático clássico, encontrado em diversas literaturas de eletromagnetismo, observamos que o programa utilizado na simulação é simples e de fácil aprendizagem, rendendo resultados aproximados coerentes em tempo real. Neste trabalho foram apresentados os diversos passos para a perfeita utilização do software FEMM 4.2 para a criação do modelo do problema; que são:

- Criação do modelo no espaço utilizando nós e linhas;
- Adição de tipos de materiais ao modelo e como atribuí-los nas regiões;
- Especificação do tamanho da malha de elementos finitos;
- Definição das propriedades condutoras no modelo;

- Aplicação das propriedades condutoras para segmentos de linhas no modelo;
- Rodar o gerador de malha;
- Rodar o pós-processador e verificar as características do modelo, tais como, nesse caso, a carga resultante e a tensão em cada condutor, resolvendo, assim, o problema.

Conclui-se que o FEMM 4.2 é um software adequado para a modelagem bidimensional de problemas eletromagnéticos.

REFERÊNCIAS

Courant, R. "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations", *Bull. Am. Math. Soc.*, vol. 49, 1943, pp.1 – 23.

Silvester, P.P. and Ferrari, R. L., *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 3rd ed., 1996.

Desai, C. S. and Abel, J. F., *Introduction to the Finite Element Method: A Numerical Approach for Engineering Analysis*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.

Sadiku, M. N. O., "A sample introduction to finite element analysis of electromagnetic problems", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 32, no. 2, May 1989, pp. 85 – 93.

Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, User's Manual, 2008, Available: <http://femm.foster-miller.com>.

Nogueira, A. F. L., "Experimentos para o Ensino de Eletrostática com auxílio computadorizado". *Revista Brasileira do Ensino de Física*. vol. 28. n. 4. p. 445 - 451, 2006.

Nogueira, A. F. L. and Le Bordec, R.M. "Computer-Aided analysis of gapped-core inductors operating under a wide range of excitations". ISEC - Coimbra, Portugal: 27 e 28/11/2007.

Cardoso, J. R., *Introdução ao Método dos Elementos Finitos: para Engenheiros Eletricistas*, 1ª ed., Publicação Independente.

Sadiku, M. N. O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*. 2nd ed., CRC Press: Florida, 2001.

SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE CULTURA CELULAR IN VITRO VIA BIOIMPEDÂNCIA ELÉTRICA: REGRAS DE PROJETO

Data de aceite: 01/06/2020

Kaue Felipe Morcelles

Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica, Joinville

kaue.morcelles@udesc.edu.br

Pedro Bertemes Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica, Joinville

RESUMO: Espectroscopia de impedância elétrica é uma técnica de caracterização de tecidos biológicos, e seus atrativos são o baixo custo, fácil implementação, portabilidade, eficiência, possibilidade de não-invasão e boa precisão. A técnica pode ser utilizada em inúmeras aplicações, entre elas o imageamento dinâmico do sistema pulmonar, detecção de câncer, avaliação não-invasiva de glicose e caracterização da massa corporal. Este trabalho foca na aplicação da bioimpedância na análise de culturas celulares, cujas principais vantagens são monitoramento contínuo em tempo real, manutenção da cultura intacta durante análise, estudo de diversas fases da cultura sem necessidade de experimentos paralelos, facilidade na operação, monitoramento remoto e introdução de parâmetros quantitativos confiáveis para avaliação, aumentando reprodutibilidade de resultados. Utilizando a técnica de bioimpedância, o usuário pode analisar o crescimento, comportamento, migração, adesão, constituição, saúde e diferenciação celular. Estes parâmetros são de extrema importância na área biomédica, tanto na academia quanto na indústria farmacêutica e cosmética. Diversos sistemas e técnicas de bioimpedância para culturas celulares foram propostos na literatura, onde a maioria é constituída por um sistema eletrônico de excitação, medição e processamento de sinais. Para esta aplicação, o sistema de medição é crítico, pois os níveis de tensão são muito baixos (entre micro e milivolts), necessitando, portanto de um circuito de alta precisão e um padrão de excitação adequado. Além disso, os eletrodos devem ser biocompatíveis, garantir adesão celular e possuir baixa impedância. Este trabalho tem como objetivo fornecer as principais diretrizes para projeto e implementação de um sistema de bioimpedância para monitoramento em culturas celulares, capaz de suportar diversas técnicas e padrões de excitação. O capítulo discute os diversos estágios que compõem o sistema analógico e

digital, além da caracterização do sinal a ser medido.

PALAVRAS CHAVE: Bioimpedância Elétrica, Culturas Celulares, Regras de Projeto

ABSTRACT: Electrical impedance spectroscopy is a technique for characterizing biological tissues, and its attractions are low cost, easy implementation, portability, efficiency, possibility of non-invasion and good precision. The technique can be used in numerous applications, including dynamic imaging of the pulmonary system, cancer detection, non-invasive glucose assessment and characterization of body mass. This work focuses on the application of bioimpedance in the analysis of cell cultures, whose main advantages are continuous monitoring in real time, maintenance of the culture intact during analysis, study of different phases of the culture without the need for parallel experiments, ease of operation, remote monitoring and introduction of reliable quantitative parameters for evaluation and increasing reproducibility of results. By bioimpedance technique, the user can analyze growth, behavior, migration, adhesion, constitution, health and cell differentiation. These parameters are extremely important in the biomedical area, both in academia and in the pharmaceutical and cosmetic industry. Several bioimpedance systems and techniques for cell cultures have been proposed in the literature, where most of them consist of an electronic system for excitation, measurement and signal processing. For this application, the measurement system is critical, as the voltage levels are very low (between micro and millivolts), therefore requiring a high precision circuit and an adequate excitation pattern. In addition, the electrodes must be biocompatible, guarantee cell adhesion and have low impedance. This work aims to provide the main guidelines for the design and implementation of a bioimpedance system for monitoring cell cultures, capable of supporting various techniques and excitation patterns. The chapter discusses the various stages that make up the analog and digital system, in addition to the characterization of the signal to be measured.

KEYWORDS: Electrical Bioimpedance, Cell Cultures, Project Rules.

1 | INTRODUÇÃO

O cultivo de células de mamíferos *in vitro* é de vital importância para a biomedicina, pois através de culturas celulares é possível analisar o comportamento de órgãos e tecidos em diversos contextos, à nível celular e com maior controle do ambiente (temperatura, pressão, pH) (FRESHNEY, 2011). Para realizar experimentos em culturas, é preciso analisar o seu estado biológico em diversos pontos no tempo. Os protocolos de análise atuais são geralmente baseados na utilização de pigmentos e microscopia ótica. Porém, a análise via microscópio é normalmente destrutiva para o cultivo, devido uso de protocolos invasivos (FRESHNEY, 2011). Portanto, este campo de pesquisa carece de técnicas que sejam capazes de analisar o estado da cultura celular em tempo real e de maneira não-invasiva.

A medição de bioimpedância elétrica é uma técnica que utiliza sinais eletromagnéticos

para caracterizar a constituição e estrutura de um material biológico utilizando informação sobre sua condutividade e permissividade elétrica (GRIMNES; MARTINSEN, 2008). No contexto de culturas celulares, a bioimpedância é capaz de analisar atividade, estrutura, crescimento e adesão celular em cultura ao substrato, podendo monitorar de forma contínua e remota a saúde das células e reação a estímulos externos sem necessidade de interferência química ou mecânica no experimento, podendo assim minimizar tempo, recursos e aumentar reprodutibilidade dos resultados (GIAEVER; KEESE, 1986; HUERTAS, Gloria *et al.*, 2013). Normalmente as medições de bioimpedância para análise de constituição são tomadas em várias frequências, sendo nestes casos chamadas de Espectroscopia por Impedância Elétrica (EIS) (GRIMNES; MARTINSEN, 2008).

Dispositivos comerciais para monitoramento de cultura celular via bioimpedância utilizam a técnica chamada Sensoriamento de Impedância Elétrica de Célula-Substrato (do inglês ECIS[®], criado pela empresa *Applied Biophysics*). ECIS consiste na análise de impedância multifrequencial sentida por um microeletrodo, normalmente feito de ouro e inserido na base de uma placa de cultura celular, em relação a um eletrodo de referência quando uma corrente elétrica é aplicada. Com o crescimento da cultura, o eletrodo é recoberto por células e a impedância medida é alterada, sendo esta variação uma função da área coberta e da constituição e adesão celular (GIAEVER; KEESE, 1986). Através de um modelo elétrico da interface entre eletrodo e célula/substrato previamente estimado, a impedância obtida é convertida em características biológicas para análise pelo usuário. Como a medição é bipolar, o modelo deve ser modificado para cada tipo de material utilizado nos eletrodos e no meio de cultura, dificultando utilização de materiais com propriedades temporalmente variantes (como sal de polianilina, que modifica gradualmente sua condutividade em pH fisiológico (BALINT; CASSIDY; CARTMELL, 2014). Entretanto, ECIS não é a única forma de se realizar monitoramento de células via bioimpedância. De fato, qualquer técnica que empregue EIS nos eletrodos na cultura pode ser utilizada, se baseada em um modelo adequado e um protocolo seguro. Uma alternativa é a utilização de medições tripolares e tetrapolares, que torna a medição independente do eletrodo (GRIMNES; MARTINSEN, 2008), bio-osciladores, que podem simplificar e acelerar o processo de medição (HUERTAS, Gloria *et al.*, 2013) the oscillator parameters (frequency, amplitude, phase, etc., e imageamento via tomografia por impedância elétrica (EIT), que pode gerar mais informações sobre a distribuição das células no substrato através do mapeamento de condutividade e permissividade na cultura celular (LINDERHOLM *et al.*, 2008).

Este capítulo, portanto, tem como objetivo fornecer as principais diretrizes de projeto para sistemas de medição de bioimpedância aplicados em culturas celulares. São abordados neste capítulo: caracterização do sinal elétrico esperado para a aplicação, diferentes fontes de corrente para o circuito de excitação, particularidades do sistema de medição de tensão, efeitos do estágio de comutação, pré-processamento e processamento digital do

sinal, interface gráfica para apresentação dos resultados de medição e recomendações para testes de simulação e bancada.

2 | METODOLOGIA DE PROJETO

O equipamento genérico de medição de bioimpedância é composto pelo circuito de excitação, que injeta corrente elétrica na amostra, pelo circuito de instrumentação, que mede os sinais de tensão resultantes, pelo estágio de comutação, que realiza o chaveamento entre diferentes eletrodos, pelo circuito de condicionamento e, por fim, pelo sistema de processamento de sinais. Para que este sistema seja bem projetado, porém, é necessário realizar a caracterização do sinal, que dará os requisitos de projeto para cada bloco do equipamento.

2.1 Caracterização do sinal

Para caracterização dos sinais a serem medidos é necessário obter informação sobre o nível de corrente, nível de tensão e impedância da amostra. Por exemplo, Gianever e Keese (1986) aplicaram um sinal de corrente de 1 μA para medição de bioimpedância. Huertas *et al* (2015) sugere uma faixa segura de 1 a 20 μA de corrente de excitação, e avisa que o modelo de circuito proposto no trabalho funciona até 100 mV de tensão na amostra.

Diversos trabalhos descreveram as impedâncias medidas por sistemas ECIS, que devem considerar a impedância de eletrodo somada com a impedância da camada celular. Como estes valores variam com a aplicação, deve-se projetar o instrumento de forma a atender o maior número possível de casos. As curvas de impedância em função da frequência (veja Figura 1) descrevem os valores absolutos para uma aplicação com células do tipo HUVEC (endoteliais da veia umbilical), além do comportamento dispersivo da amostra, utilizando diversos tamanhos de eletrodos (ABDUR RAHMAN; PRICE; BHANSALI, 2007). Na configuração, recomenda-se o uso de dois eletrodos de mesmo tamanho para excitação e medição, e, portanto, a impedância medida consiste na soma das duas impedâncias de interface. Para uma situação equivalente, com o mesmo tamanho de eletrodo e mesmo tipo de célula, porém utilizando um eletrodo de medição e um de referência com área muito maior, como proposto por Gianever e Keese (1986), espera-se que a impedância seja aproximadamente metade das apresentadas por Rahman, Price e Bhansali (2007). As curvas da Figura 1 são utilizadas com referência para guiar o sistema de aquisição. A escolha dá-se pela descrição detalhada (em módulo e fase) da impedância ECIS de um grupo celular tipicamente utilizado em culturas, mostrando também o comportamento dispersivo na faixa de frequência de interesse. Além disso, os valores absolutos e relativos estão na mesma ordem de grandeza de resultados, utilizando

diferentes grupos celulares, apresentados por outros autores (DAZA, Paula *et al.*, 2013; GIAEVER; KEESE, 1986; SZULCEK *et al.*, 2014; TRAN; BAEK; MIN, 2016; YUFERA, A *et al.*, 2011).

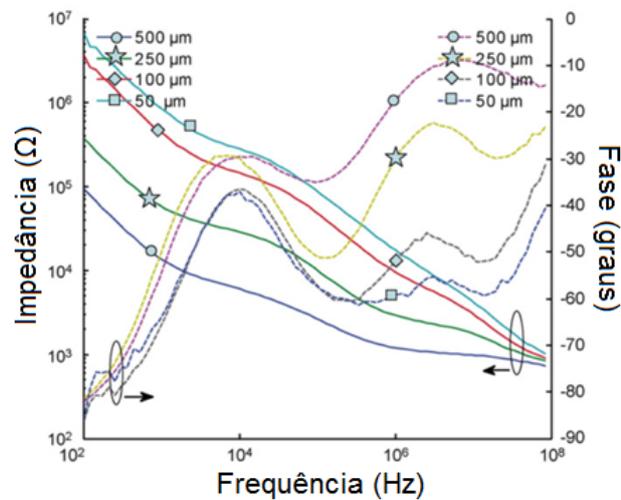


Figura 1: Impedância utilizando HUVEC com vários tamanhos de eletrodos (ABDUR RAHMAN; PRICE; BHANSALI, 2007)conductive gel used in electrocardiography (ECG)

2.2 Excitação e instrumentação analógica

Para este tipo de sistema de monitoramento, o circuito de excitação elétrica deve ser capaz de aplicar uma corrente mínima de 1 μA , com precisão e baixo ruído, e limitar, no máximo, a 10 μA (50% do valor máximo sugerido por (HUERTAS, Gloria *et al.*, 2015). Para alcançar estes objetivos, pode-se utilizar diferentes tipos de fonte de corrente: fonte *Howland* Modificada (HM), que oferece bom controle do sinal aplicado e flexibilidade na forma de onda; fonte HM seguida por um *buffer* de corrente (HMB), que possibilita alta impedância e excursão de saída da HM comum (MORCELLES *et al.*, 2017a); amplificadores de transcondutância (OTA), que permitem menores variações paramétricas durante implementação; fonte de tensão em série com um resistor de controle (TR), utilizada por (GIAEVER; KEESE, 1986) e em grande parte de outras aplicações ECIS, que possibilita implementação simplificada; ou o circuito do bio-oscilador proposto por (HUERTAS, Gloria *et al.*, 2015), que injeta um sinal autossustentado. Caso seja desejado um sistema modular (para acomodar diversos tipos de fontes de corrente no mesmo dispositivo), algumas precauções extra devem ser consideradas. Os conectores utilizados para ligar o módulo de excitação à placa de interface devem possuir baixa capacitância parasita, a fim de manter o bom funcionamento das fontes de corrente.

É esperado que os excitadores utilizados no projeto sejam simulados e testados em bancada para verificação da performance. Os principais parâmetros a serem considerados em projeto e avaliação dos circuitos são: transcondutância (em termos de módulo e banda), erro de corrente máximo em toda a banda de frequências ($erro_{MHz}$), impedância

de saída Z_{out} e linearidade. A Equação 1 corresponde à transcondutância da *HM* e *HMB* com tensão na entrada não-inversora da fonte. As Equações 2 e 3 descrevem impedância de saída e carga máxima para a fonte *HM*, enquanto as equações 4 e 5 correspondem aos mesmos parâmetros para a fonte *HMB* (MORCELLES *et al.*, 2017b; TUCKER; FOX; SADLEIR, 2013). As variáveis R_1 , R_{2A} , R_{2B} , R_3 e R_4 correspondem aos resistores das fontes *HM* e *HMB*, conforme a Figura 2, enquanto $A_o(s)$ e $A_{o2}(s)$ são os ganhos de malha aberta dos Amplificadores Operacionais (*AMPOP*). V_{SAT} é a tensão de saturação dos *AMPOPs*, $CMRR$ e C_{in} são a rejeição de modo comum do amplificador A_o e a capacitância de entrada do amplificador A_{o2} , respectivamente. Por fim, I_{out} é a corrente de saída das fontes e R_L representa a carga. Estas equações não consideram descasamento entre os resistores, que podem ser calibrados na placa para minimizar assimetria.

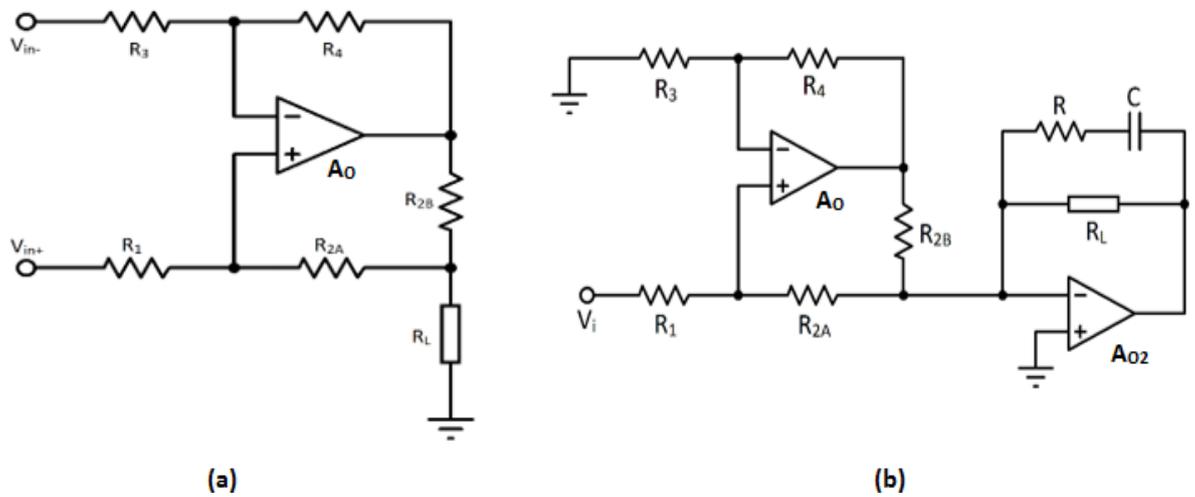


Figura 2: Fonte de corrente Howland Modificada (a) e Howland Modificada seguida de *buffer* de corrente (b).

$$G^+_{HM} = G^+_{HMB} = \frac{R_{2A} + R_{2B}}{R_1 R_{2B}} \frac{1}{1 + \frac{R_4/R_3}{2\pi f H} + 1} \quad (1)$$

$$Z_{out,MF} = (R_{2B} // (R_{2A} + R_1)) \frac{1 + A_o(s) \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{1 + \frac{A_o(s) \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{CMRR(s)}} \quad (2)$$

$$Z_{máx,MF} = \frac{\frac{V_{sat}}{I_{out}} - R_{2B}}{1 + \frac{R_{2B}}{R_1 + R_{2A}}} \quad (3)$$

$$Z_{out,MFB} = \left(\frac{Z_{out,MF}}{s C_{in} Z_{out,MF} + 1} \right) (1 + A_{o2}(s)) \quad (4)$$

$$Z_{máx,MFB} = \min \left[\frac{V_{sat}}{I_{out}} \left(1 + \frac{1}{A_{o2}(s)} \right), \frac{\frac{V_{sat}}{I_{out}} - R_{2B}}{1 + \frac{R_{2B}}{R_1 + R_{2A}}} (1 + A_{o2}(s)) \right] \quad (5)$$

Nota-se que a transcondutância independe da carga. Isto, em conjunto com a alta impedância de saída, caracterizam por completo uma fonte de corrente linear, capaz de manter a amplitude da corrente de saída constante, mesmo com diferentes cargas.

As equações 6 e 7 descrevem a transcondutância e impedância de saída da fonte TR , que podem ser obtidas através de simples análise de circuito, considerando uma fonte de corrente equivalente de I , onde R_S é o resistor série com a fonte de tensão de entrada. É possível notar que a impedância de saída é limitada pelo valor da transcondutância: quanto maior a corrente que se deseja, menor é a impedância de saída. Porém, como a aplicação exige uma baixa corrente de $1 \mu\text{A}$, a impedância de saída pode facilmente ultrapassar $1 \text{ M}\Omega$ (máximo de $3,3 \text{ M}\Omega$ considerando I de um conversor D/A com máximo de $3,3 \text{ V}$), utilizando apenas um simples resistor como topologia.

$$G_{TF} = \frac{1}{R_S} \quad (6)$$

$$Z_{out,TF} = R_S \quad (7)$$

Os parâmetros do *OTA* dependem totalmente do componente integrado que será utilizado, que ainda será definido, sendo o projeto restrito à escolha do melhor modelo do fabricante. Já o bio-oscilador, por não ser um excitador convencional, não pode ser avaliado em termos de impedância de saída ou transcondutância, portanto os parâmetros verificados neste caso devem ser a frequência e amplitude centrais do sinal medido, e a sensibilidade dos dois parâmetros à impedância da amostra, baseando-se no trabalho de (HUERTAS, Gloria *et al.*, 2015). Por se tratar de uma técnica recente, a relação entre impedância e amplitude/frequência de oscilação é não-linear e não ainda não foi modelada por uma equação direta e generalizada. Porém, a influência entre impedância e sinal de oscilação para um caso específico é apresentada em (MALDONADO, A. *et al.*, 2017).

Na maioria dos casos, o circuito de medição de tensão consiste em um amplificador de instrumentação, podendo ou não ser antecipado por *buffers* para aumentar impedância de entrada. Porém, certos excitadores, como no caso do bio-oscilador, necessitam apenas de amplificadores simples. Independentemente da topologia utilizada, o estágio de medição deve fornecer uma entrada adequada para o estágio de condicionamento, considerando que a tensão nos eletrodos pode estar na faixa de 100 a 3 mV , por exemplo (dada a curva do eletrodo de $500 \mu\text{m}$ na Figura 1 e excitação de $1 \mu\text{A}$). Assim, o estágio de medição deve operar com alto ganho e baixo ruído. Como a entrada deste circuito pode estar em paralelo com a carga (ver Figura 3), capacitância de entrada deve ser baixa, para evitar fuga de corrente pelas capacitâncias parasitas. A impedância de saída efetiva para o sistema, neste caso, pode ser descrita pela Equação 8, onde C_p é a capacitância parasita introduzida pelo estágio de medição e Z_{out} é a impedância de saída da fonte de corrente, considerando um componente de medição com entrada *FET*.

$$Z_{out,ef} = Z_{out} // \frac{1}{sC_p} \quad (8)$$

A fim de medir a corrente na carga, recomenda-se o uso de um amplificador de transimpedância (*TIA*) em série com a amostra, realizando conversão em tensão com apenas um estágio. Isto possibilita maior excursão e banda. Isto porque a impedância de entrada do amplificador de transimpedância, independente de seu ganho, é muito baixa (idealmente zero). Portanto, a influência do *TIA* no funcionamento do circuito é menor que utilizando um resistor *shunt*. Os critérios de baixo ruído e alto ganho também valem para este estágio, pois a corrente a ser medida é de apenas 1 μA , por exemplo.

A Figura 3 mostra o esquema de um circuito proposto para excitação e medição, considerando o caso em que se utilize a fonte HM para excitação, amplificador de instrumentação integrado para medição de tensão e *TIA* para medição de corrente. A rede de comutação é explicada na seção seguinte.

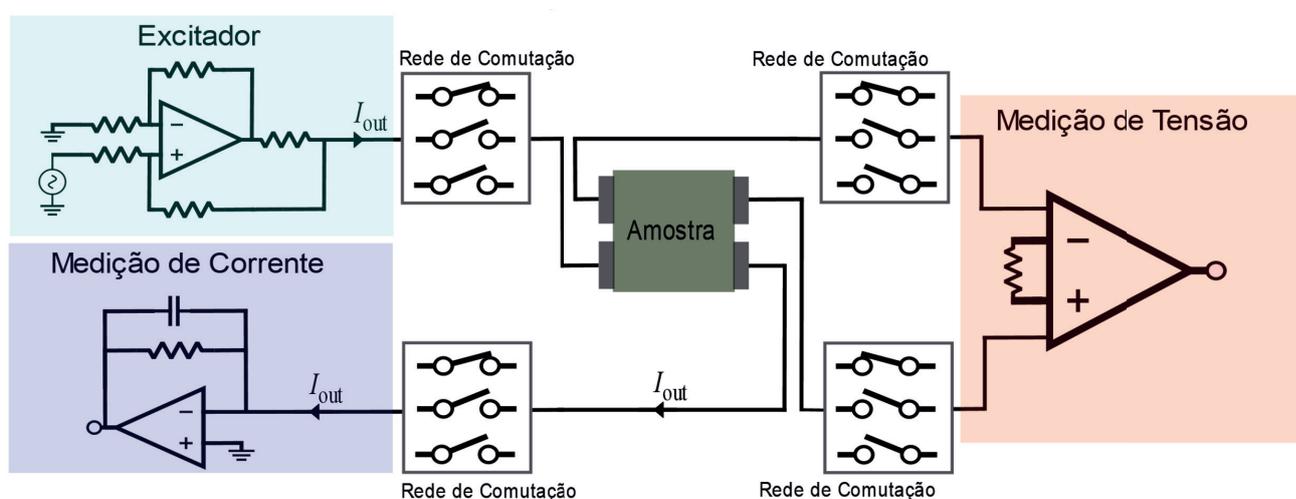


Figura 3: Sistema de excitação e medição utilizando fonte HM, amplificador de instrumentação e *TIA*.

2.3 Condicionamento de sinal e comutação

O alto ganho dos módulos de medição é importante para reduzir o ruído total introduzido pelo sistema, porém ainda não é o suficiente para aproveitar toda a excursão do conversor analógico digital (A/D). Assim, posterior aos módulos de medição de tensão e corrente, devem ser implementados amplificadores de ganho controlado (AGC). Isto permite que o valor da tensão medida seja ajustado de maneira dinâmica, para que a resolução máxima do A/D seja utilizada em todas as medições. Para ajuste preciso e contínuo do ganho, é necessário um estágio de detecção de pico que informará ao sistema a amplitude do sinal em tempo real. Este bloco pode ser implementado de maneira digital.

Além disso, recomenda-se utilizar compensações para adequar o sinal ao conversor A/D. Como a corrente de excitação na carga deve ser alternada, um ajuste de *offset* no sinal lido é necessário, pois depende da alimentação do microcontrolador a ser utilizado (por exemplo, 0 a 3,3 V). Este ajuste deve ser feito nos últimos estágios analógicos de medição, para considerar todos os níveis *offsets* do circuito, através dos conversores

digital-analógicos (D/A) do microcontrolador. Sendo esta correção implementada de maneira digital, ela pode ser alterada constantemente para corrigir desvios de temperatura. O ajuste de *offset* também deve ser implementado no circuito de excitação, com intuito de eliminar o sinal DC oriundo do conversor D/A que gera o sinal aplicado na amostra.

Sistemas ECIS normalmente utilizam vários poços de cultura celular durante um único experimento. Por isso, uma rede de chaveamento do sinal aplicado e medido deve ser implementada para que todos os poços sejam monitorados pelo sistema de aquisição (como mostrado na Figura 3). Para tanto, faz-se necessário o uso de multiplexadores analógicos posteriores ao circuito de excitação e anteriores ao circuito de medição, a fim de obter flexibilidade nas configurações de eletrodo (configuração bipolar, tripolar ou tetrapolar). Caso os poços sejam monitorados um por vez, faz-se necessário a construção de uma lógica de seleção via microcontrolador. Como a dinâmica da cultura celular é relativamente lenta, velocidade de chaveamento não é fator determinante para a escolha dos multiplexadores. Porém, para evitar fugas de corrente de excitação e quedas de tensão na medição, a capacitância paralela e resistência série dos canais devem ser baixas. Além disso, o *cross-talk* deve ser reduzido, para garantir isolamento entre os poços. Por fim, a banda de operação analógica do multiplexador deve ser suficiente para não atenuar o sinal em altas frequências.

Para evitar que frequências mais altas que a condição de *Nyquist* e ruído eletromagnético alcancem o conversor A/D, um filtro anti-recobrimento de ao menos segunda ordem deve ser implementado como último estágio do circuito, podendo ser um circuito *Sallen-Key* de segunda ordem (para suficiente atenuação das interferências) seguido de um filtro RC série, para fornecer as correntes de alta frequência necessárias para o A/D (requeridos em topologias SAR, por exemplo).

2.4 Circuito de processamento digital e automação

O circuito de processamento digital deve ser responsável por realizar as conversões A/D, D/A, gerar os sinais de excitação, coordenar a comutação entre poços, implementar as compensações de *offset*, realizar detecção de pico e controlar de maneira dinâmica o ganho do AGC. A fim de reduzir a necessidade de computação externa, também é possível implementar operações matemáticas complexas com os sinais medidos, como filtragens, transformadas rápidas de Fourier (FFT) e amplificação *lock-in* digital (GRIMNES; MARTINSEN, 2008). Um exemplo para isso é o uso da DSP STM32F303ZE embebido na plataforma NÚCLEO-144. Esta plataforma conta com uma taxa de amostragem de 5 MSPS, conversão analógica digital SAR de 12 bits, diversos periféricos e protocolos de comunicação integrados na placa.

A cultura de células requer que o equipamento opere dentro de uma incubadora, isolado do ambiente exterior para obter condições atmosféricas adequadas para cultivo

celular (GIAEVER; KEESE, 1986). Assim, é importante que o instrumento possa ser acessado e controlado de maneira remota, através de um módulo *Wi-Fi*, ou com número reduzido de cabos de controle. A placa de desenvolvimento NUCLEO-144, usado como exemplo, permite a inserção deste tipo de módulo.

2.5 Interface gráfica e controle de usuário

A fim de que o usuário possa analisar os dados de forma visual e operar o instrumento de maneira remota através de um computador, recomenda-se a implementação de uma interface útil e amigável. Nela, é possível analisar gráficos de impedância e qualidade do sinal em tempo real, além de selecionar o poço monitorado, frequência, tipo e amplitude do sinal de excitação, e implementar rotinas de calibração dos diversos estágios de medição da circuitaria analógica. Dado que a linguagem de programação deva ser preferivelmente amigável, recomenda-se o uso de *Python*, por seu alto nível, livre acesso e fácil implementação na área de interfaces e processamento de sinais, através dos pacotes PyQt e ScyPy, respectivamente.

2.6 Simulações

Para fim de validação inicial dos circuitos analógicos, recomenda-se o uso do *software* de simulação PSPICE, da plataforma ORCAD. Nesta etapa, pode-se incluir a maior quantidade possível de não-idealidades previstas nos circuitos, a fim de obter uma previsão fiel dos resultados experimentais. As fontes de excitação devem ser simuladas em termos de impedância de saída, transcondutância, linearidade e erro de corrente de saída utilizando um fantoma RC com as características apresentadas na seção 1.1. Para obter fidelidade com o circuito completo, estes parâmetros devem ser avaliados com o sistema de comutação e medição inseridos no circuito, para contabilizar suas componentes parasitas no desempenho. Além disso, o circuito de medição deve ser avaliado pela banda, ganho, ruído, linearidade, tensões de *offset* e erro máximo de saída. Também, é importante simular as configurações para calibração e conseqüente redução destes erros durante uma futura implementação. O circuito como um todo também deve ser analisado em termos de robustez e variações com temperatura, utilizando também análises de Monte Carlo. Para maior fidelidade com o circuito real, recomenda-se o uso de modelos de alto nível fornecidos pelos fabricantes.

2.7 Proposta de validação experimental

Nesta etapa, cada módulo do equipamento deve ser testado separadamente para avaliar seu desempenho. Os resultados devem ser processados a fim de contabilizar a precisão e exatidão total do instrumento. Para os circuitos analógicos, os mesmos parâmetros avaliados em simulação devem ser considerados nos testes experimentais. Nos testes da circuitaria digital, recomenda-se realizar as medições por meio de um

osciloscópio digital de captura de dados nos ensaios práticos.

O equipamento proposto deve ser analisado, primeiramente, utilizando-se um fantoma RC, baseado nos dados da seção 1.1 e nas simulações (seção 1.6). O objetivo deste teste é obter a acurácia do equipamento na medição de impedância do fantoma em comparação com outras técnicas da literatura. Como fonte de referência padronizada, recomenda-se o uso de um analisador de impedância comercial.

3 | DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Prevê-se que as principais dificuldades a serem encontradas neste projeto sejam as limitações dos componentes integrados. Isto porque os erros de medição inerentes destes circuitos são difíceis de serem minimizados por circuitaria externa. Assim, enfoque maior deve ser dado em topologias de circuito que ofereçam robustez e possibilidade de ajustes externos. Além disso, o microcontrolador da placa de desenvolvimento deve ser utilizado para implementar rotinas de calibração constantes, a fim de reduzir estes problemas.

Espera-se que, ao final deste capítulo, o leitor seja capaz de entender e aplicar os principais passos de projeto para um sistema de aquisição de dados para monitoramento de culturas celulares em tempo real e não-invasivo. Acredita-se que a criação de novos equipamentos desenvolvidos na área gerará possibilidades para novas pesquisas envolvendo engenharia de tecidos, comportamento e constituição celular, biocompatibilidade de produtos químicos, tratamento e diagnósticos de doenças, e interação de tecidos vivos com campos eletromagnéticos.

REFERÊNCIAS

ABDUR RAHMAN, A. R.; PRICE, D. T.; BHANSALI, S. Effect of electrode geometry on the impedance evaluation of tissue and cell culture. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, 2007. v. 127, n. 1, p. 89–96.

BALINT, R.; CASSIDY, N. J.; CARTMELL, S. H. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. **Acta Biomaterialia**, 2014. v. 10, n. 6, p. 2341–2353. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2014.02.015>>.

DAZA, Paula *et al.* Monitoring living cell assays with bio-impedance sensors. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, 2013. v. 176, p. 605–610.

FRESHNEY, R. I. **Culture of Animal Cells: A Manual of Basic Technique and Specialized Applications: Sixth Edition**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

GIAEVER, I.; KEESE, C. R. Use of Electric Fields to Monitor the Dynamical Aspect of Cell Behavior in Tissue Culture. **Biomedical Engineering, IEEE Transactions on**, 1986. v. BME-33, n. 2, p. 242–247.

GRIMNES, S.; MARTINSEN, Ø. G. **Bioimpedance and bioelectricity basics**. [S.l.]: Academic, 2008.

HUERTAS, Gloria *et al.* Oscillation-Based Test applied to cell culture monitoring. **Proceedings of IEEE Sensors**, 2013. v. 1, p. 2–5.

_____. *et al.* The bio-oscillator: A circuit for cell-culture assays. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, 2015. v. 62, n. 2, p. 164–168.

LINDERHOLM, P. *et al.* Cell culture imaging using microimpedance tomography. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, 2008. v. 55, n. 1, p. 138–146.

MALDONADO, A. *et al.* Monitoring tissue evolution on electrodes with bio-impedance test. **2016 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems, DCIS 2016 - Proceedings**, 2017. p. 213–218.

MORCELLES, K. F. *et al.* Howland current source for high impedance load applications. **Review of Scientific Instruments**, nov. 2017a. v. 88, n. 11, p. 114705. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5005330>>.

_____ *et al.* Howland current source for high impedance load applications. **Review of Scientific Instruments**, nov. 2017b. v. 88, n. 11, p. 114705.

SZULCEK, R. *et al.* Electric Cell-substrate Impedance Sensing for the Quantification of Endothelial Proliferation, Barrier Function, and Motility Video Link. **J. Vis. Exp**, 2014. n. 8510. Disponível em: <www.jove.com>.

TRAN, T. B.; BAEK, C.; MIN, J. Electric cell-substrate impedance sensing (ecis) with microelectrode arrays for investigation of cancer Cell - Fibroblasts interaction. **PLoS ONE**, 2016.

TUCKER, A. S.; FOX, R. M.; SADLEIR, R. J. Biocompatible, high precision, wideband, improved howland current source with lead-lag compensation. **IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, 2013. v. 7, n. 1, p. 63–70.

YUFERA, A *et al.* Cell Biometrics Based on Bio-Impedance Measurements. **Advanced Biometric Technologies**, 2011. n. August 2011, p. 343–366. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/cell-biometrics-based-onbio-impedance-measurements>>.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

MARCELO HENRIQUE GRANZA - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Eletrônico. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Doutorando em Engenharia Elétrica. Trabalha com os temas: conversores estáticos com alto fator de potência, acionamento e controle de motores e geradores elétricos de indução.

ÍNDICE REMISSIVO

SÍMBOLOS

5G 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 95, 96

A

Antenas de microfita 95, 96, 107

Ataques de rede 130

Automação 2, 40, 59, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 159, 163, 167, 168, 260

C

Chave 2, 17, 26, 37, 40, 54, 69, 74, 75, 82, 96, 108, 130, 139, 151, 157, 170, 190, 201, 213, 216, 224, 236, 253

Computação 95, 129, 139, 140, 141, 152, 153, 156, 190, 192, 198, 200, 211, 260

Comunicação 1, 4, 5, 14, 22, 23, 24, 28, 36, 57, 69, 70, 71, 74, 76, 77, 81, 95, 96, 97, 99, 102, 106, 111, 112, 121, 122, 124, 130, 132, 133, 226, 260

Controle 1, 2, 3, 4, 5, 9, 15, 16, 23, 24, 26, 27, 29, 32, 33, 34, 36, 38, 40, 41, 47, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 58, 64, 65, 73, 75, 77, 133, 158, 159, 163, 165, 166, 167, 168, 225, 227, 228, 234, 253, 256, 261, 264

CyberSegurança 130

D

Desempenho 4, 34, 57, 58, 68, 69, 75, 82, 95, 99, 106, 109, 112, 113, 114, 117, 120, 122, 123, 125, 139, 142, 144, 145, 149, 153, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 188, 202, 203, 209, 215, 261

Dinâmico 1, 2, 3, 4, 5, 6, 15, 252

E

Equação polar 96, 97, 98, 99

Equilíbrio 1, 2, 3, 4, 5, 142, 171, 172, 173, 175

F

Fauna 17, 18, 25

Filtro de Kalman 1, 2, 5, 10, 12, 14, 15

I

Indicadores 18, 37, 55, 69, 76, 77, 117, 141, 199

Informação 27, 28, 29, 32, 36, 58, 62, 67, 77, 111, 121, 130, 131, 133, 135, 151, 152, 153, 154, 156, 193, 199, 210, 222, 224, 225, 227, 235, 254, 255

Irrigação 40, 41, 45, 46, 47, 50, 52, 53

L

LQR 1, 2, 5, 10, 13, 14, 15

M

Máquinas virtuais 139, 141, 142, 143, 144

Migração 139, 141, 142, 143, 144, 145, 148, 252

N

Nuvem 139, 140, 141, 142, 145

O

Osmose 40, 41, 43, 44, 45, 49, 51, 52

P

Pentest 130, 134, 135, 137

Programação linear inteira mista
139

Proteção 17, 134, 135, 172, 173, 179, 187

R

Redes corporativas 130, 131

Robô 1, 3, 4, 5, 6, 9, 15, 17, 18, 21, 22, 23, 24

S

Segurança 21, 22, 24, 25, 30, 34, 60, 64, 72, 73, 75, 130, 131, 132, 133, 135, 137, 151, 152, 153,
156, 158, 159, 160, 161, 164, 167, 168, 175, 177, 188, 193, 211, 235

Sem fio 41, 70, 71, 79, 95, 96, 97, 99, 102, 106

Simulink 1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 16

Sinalizador avifauna 17, 18

Sistemas verticais 69, 70

Super fórmula de Gielis 95, 96

T

Topologia distribuída 69, 77

 **Atena**
Editora

2 0 2 0