

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA

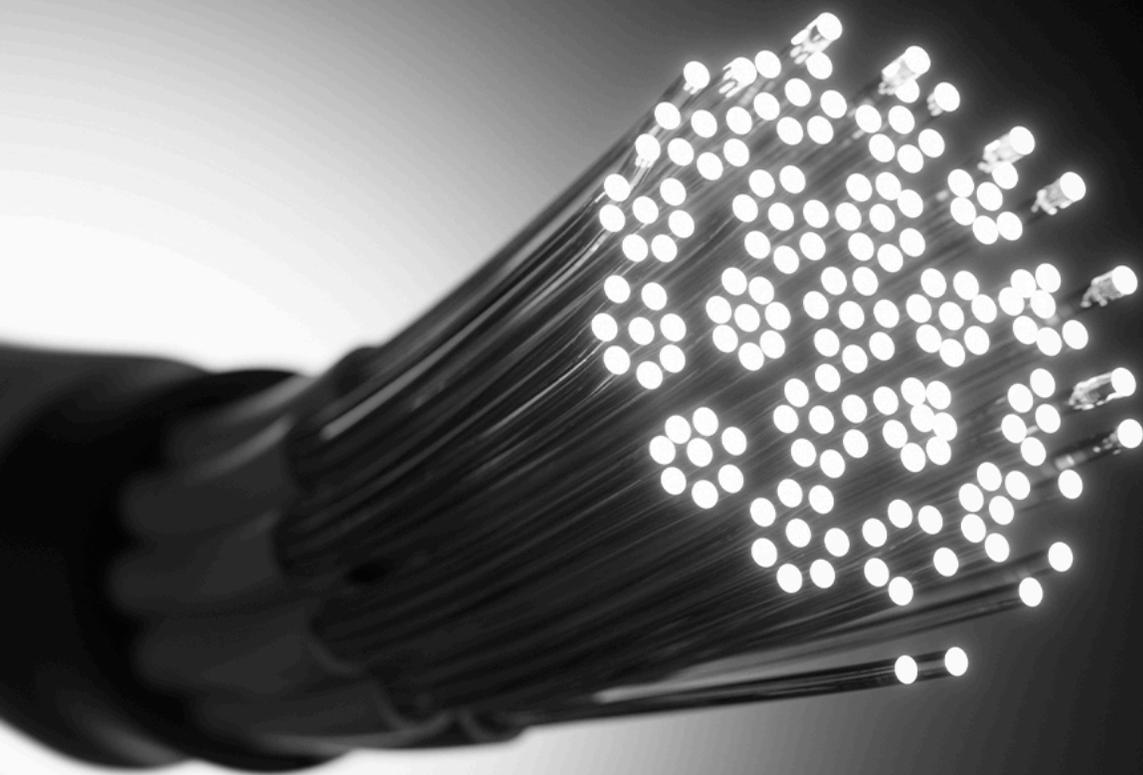


LILIAN COELHO DE FREITAS  
(ORGANIZADORA)

Atena  
Editora  
Ano 2021

COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA ELÉTRICA**



LILIAN COELHO DE FREITAS  
(ORGANIZADORA)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes editoriais**

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

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

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

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

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

#### **Linguística, Letras e Artes**

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

## Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica

**Diagramação:** Maria Alice Pinheiro  
**Correção:** Flávia Roberta Barão  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadora:** Lilian Coelho de Freitas

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-5983-260-6  
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.606212207>

1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Elétrica é um dos ramos mais abrangentes da Engenharia, pois envolve praticamente tudo o que fazemos em nosso dia a dia. Engloba desde sistemas de potência, geração de energia, conversão eletromecânica de energia, eletrônica, telecomunicações, até engenharia biomédica, sistemas digitais e computadores, controle, automação e robótica. É considerada uma área transdisciplinar e versátil, a qual passa por constantes desafios, conforme cresce a demanda por sistemas mais econômicos e eficientes.

Nesse contexto, o e-book “*Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Elétrica*” apresenta uma seleção de 12 artigos que discutem trabalhos e pesquisas desenvolvidos por professores e acadêmicos de várias regiões do Brasil, tendo como base uma teoria bem fundamentada nos resultados práticos nesta área tão promissora.

Este volume aborda temas envolvendo inteligência computacional, para projeto de controladores e manutenção preditiva de máquinas elétricas; fluxo de carga em sistemas elétricos de potência; sistemas fotovoltaicos; fontes de energia alternativas renováveis; segurança de instalações elétricas; tratamento térmico de resíduos, entre outras. Dessa forma, esta obra contribuirá para aprimoramento do conhecimento de seus leitores e servirá de base referencial para futuras investigações.

A todos, uma ótima leitura!

Lilian Coelho de Freitas

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA ANÁLISE DE AVARIAS EM ROLAMENTOS, UTILIZANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Fábio Muniz Mazzoni

André da Silva Barcelos

Antonio J. Marques Cardoso

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122071>

### **CAPÍTULO 2..... 15**

#### **MÉTODOS MATEMÁTICOS DE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO: LÓGICA FUZZY**

Joelson Lopes da Paixão

Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122072>

### **CAPÍTULO 3..... 39**

#### **UM ESTUDO SOBRE A ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES FUZZY**

Géferson Rodrigo Sabino Silva

Wallysonn Alves de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122073>

### **CAPÍTULO 4..... 47**

#### **FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – UM ESTUDO DE CASO USANDO A LINGUAGEM AMPL**

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Diogo Marujo

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Alexander Molina Cabrera

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122074>

### **CAPÍTULO 5..... 62**

#### **ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS SUBMETIDOS A PIRÓLISE**

Victória Oliveira Diaz de Lima

Matheus de Paula Gonçalves

Débora Hungaro Micheletti

Fernanda Bach Gasparin

Amanda de Araújo Drago

Aline Bavaresco dos Santos

Adriana Ferla de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122075>

**CAPÍTULO 6..... 73**

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA NO CAMPUS UFRPE - UACSA**

Reinel Beltrán Aguedo  
Paula de Társia Borba de França  
Ania Lussón Cervantes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122076>

**CAPÍTULO 7..... 86**

**INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS DE ENERGIA COM RESTABELECIMENTO OTIMIZADO PARA O AGRONEGÓCIO**

Eloi Rufato Junior  
Bruno Dias Camargo  
Elison de Souza Moreira  
Felipe de Souza Kalume

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122077>

**CAPÍTULO 8..... 116**

**MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Bruno Tiago Carneiro Moraes  
Felipe Cléber Silveira  
Averton da Silva Portigo  
Daliel Soares de Souza  
Rafael José Fonseca Barbosa  
Franciani Diniz Branco  
Marcus Vinícius O. Braga

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122078>

**CAPÍTULO 9..... 120**

**FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍTICA**

Paulo Fernandes da Silva Júnior  
Ewaldo Eder Carvalho Santana  
Paulo Henrique Bezerra de Carvalho  
Danilo Diniz Meireles  
Francarll Oliveira Moreno  
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira  
Pedro Carlos de Assis Júnior  
Raimundo Carlos Silvério Freire

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122079>

**CAPÍTULO 10..... 135**

**TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS DE PODA URBANA**

Eveline Trindade  
Maristela Furman  
Aline Bavaresco dos Santos  
Dilcemara Cristina Zenatti  
Adriana Ferla de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220710>

**CAPÍTULO 11 ..... 143**

SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM EMPRESAS TERCEIRIZADAS NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL

Anderson Francisco Kaiser

Marcos Hister Pereira Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220711>

**CAPÍTULO 12..... 158**

REDUCTION OF THE ECOLOGICAL IMPACT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS  
WHEN USING SILICONE LIQUID IN THE PROVINCE OF ICA - 2013

Primitivo Bacilio Hernández Hernández

Omar Michael Hernández García

Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220712>

**SOBRE A ORGANIZADORA..... 170**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 171**

## A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA ANÁLISE DE AVARIAS EM ROLAMENTOS, UTILIZANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

*Data de aceite: 01/07/2021*

*Data de submissão: 08/06/2021*

### **Fábio Muniz Mazzoni**

Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade  
Federal Fluminense  
Rio das Ostras – RJ  
<https://orcid.org/0000-0003-2171-2747>

### **André da Silva Barcelos**

CISE-Electromechatronic Systems Research  
Centre – University of Beira Interior  
Covilhã – Portugal  
<https://orcid.org/0000-0002-8126-6067>

### **Antonio J. Marques Cardoso**

CISE-Electromechatronic Systems Research  
Centre – University of Beira Interior  
Covilhã – Portugal  
<https://orcid.org/0000-0001-8737-6999>

**RESUMO:** Os motores de indução trifásicos são utilizados em larga escala, onde sabe-se que a manutenção destas máquinas é preponderante para a continuidade de processos industriais. Pesquisas recentes apontam, que as avarias nos rolamentos são recorrentes e que se torna necessário desenvolver técnicas para análise, previsão e diagnóstico destas avarias. Neste contexto, este trabalho calcula as transformadas wavelet de Daubechies e Hilbert-Huang dos sinais de corrente de um motor de indução trifásico, quer para a condição normal de funcionamento e quer com avarias. Em seguida, utilizam-se ferramentas estatísticas para extrair

as características dos sinais transformados, tendo como finalidade a criação de uma base de dados para analisar e diagnosticar avarias, com auxílio de algoritmos da inteligência artificial. Os resultados apontam que é possível classificar avarias em rolamentos, utilizando a proposta desenvolvida neste trabalho, com um desempenho superior a 98%.

**PALAVRAS - CHAVE:** Motor de indução trifásico, identificação de falhas em rolamentos, transformadas no domínio tempo-frequência, inteligência artificial.

### PREDICTIVE MAINTENANCE IN BEARING FAILURE ANALYSIS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

**ABSTRACT:** Three-phase induction motors are used on a large scale, where it is known that the maintenance of these machines is preponderant for the continuity of industrial processes. Recent research shows that bearing failures are recurrent and it is necessary to develop techniques for analyzing, predicting and diagnosing these failures. In this context, this work calculates the Daubechies wavelets and Hilbert-Huang transforms of the current signals of a three-phase induction motor both in normal condition and with failures. Then, statistical tools are used to extract characteristics from the transformed signals, with the purpose of creating a database to analyze and diagnose malfunctions, with artificial intelligence algorithms. Results show that it is possible to classify failures in bearings, using the proposal developed in this work, with a performance higher than 98 %.

**KEYWORDS:** Three-phase Induction Motor, Bearing Failures Identification, Time-frequency Transforms, Artificial Intelligence.

## 1 | INTRODUÇÃO

Na economia globalizada o ambiente competitivo pode ser caracterizado pelo desenvolvimento de tecnologias e produtos, capacidade de inovação e otimização de soluções (Gilchrist, 2016). Consequentemente, a melhoria contínua dos processos produtivos é uma realidade para diversos setores de manutenção que atinge diretamente o custo dos produtos e serviços prestados devido à sua relação com áreas operacionais dentro das empresas (Kobbacy and Murthy, 2008).

Nos últimos anos, o aumento da confiabilidade de sensores, dispositivos de transmissão e armazenamento de dados promoveram o aparecimento de novos sistemas de monitorização de equipamentos e condições de operação (Gilchrist, 2016; Paolanti et al., 2018). Simultaneamente, a transmissão em tempo real destas informações industriais realizadas por dispositivos de monitorização oferece uma oportunidade analisar dados de forma inteligente, contextualizado no conceito de manutenção preditiva que pode realizar previsões do estado futuro ou detectar avarias incipientes nos mais diversos equipamentos (Fink, 2020).

Neste contexto, os mais diversos setores industriais fazem uso das técnicas e conceitos desenvolvidos no âmbito da manutenção preditiva, para aplicar suas tecnologias em maquinários industriais. Sem dúvida, a conversão de energia elétrica em mecânica está presente nos processos industriais, onde os motores de indução trifásicos (MIT's) são responsáveis por acionar equipamentos, tais como bombas, válvulas, esteiras, hélices, elevadores, entre outros. Devido ao custo reduzido de fabricação e a versatilidade para aplicações com alto rendimento, estima-se que 70% da energia consumida no setor industrial da União Europeia, está diretamente relacionada com a utilização de motores elétricos trifásicos (Merizalde et al., 2017).

Devido às características de construção e operação do MIT, avarias quer elétricas quer mecânicas podem ocorrer nessas máquinas, acarretando redução de desempenho ou interrupção de processos industriais (Cerrada et al., 2018). Os estudos publicados pelos Institute of Electrical and Eletronics Engineers (IEEE) e Eletric Power Research Institute (EPRI), apontam as falhas encontrados nos MIT's conforme Tabela 1.

	Falha nos rolamentos	Falhas elétricas	Outros
EPRI	42%	48%	10%
IEEE	40%	36%	24%

Tabela 1: Percentual de falhas no MIT de acordo com a EPRI e IEEE

As principais falhas mecânicas nos MIT's são causadas por impactos, devido à fricção do rotor com o estator, desgaste, danos durante a montagem, sobreaquecimento, quebra de barras, falhas nas pistas externa, interna e esferas dos rolamentos, desalinhamento, lubrificação insuficiente, torção e sobrecarga do eixo (Cardoso, 1991; Barcelos e Cardoso, 2021).

Para identificar avarias mecânicas no MIT, torna-se necessário adquirir variáveis de natureza mecânica, elétrica ou térmica em uma etapa determinada aquisição dos sinais. Em seguida, utilizam-se técnicas de processamento de sinais, como a transformada de Fourier para sinais estacionários e waveletes ou Hilbert-Huang, para sinais não estacionários (Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2020). Os três primeiros blocos da Figura 1, resumem essas etapas.

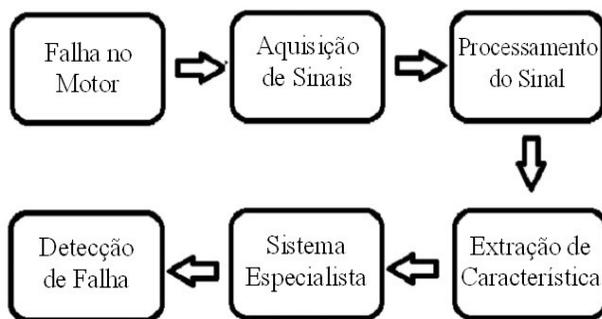


Figura 1: Etapas para a análise e diagnóstico de avarias em motores.

A extração de características recorre a ferramentas estatísticas, com objetivo de formar uma base de dados, que reflete o comportamento do MIT em condições de avarias. Ao final, utilizam-se algoritmos da inteligência artificial (IA), na condição de sistema especialista, para análise e diagnóstico, (Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2020).

Para descrever a metodologia adotada para diagnosticar avarias em rolamentos, a seção 2 apresenta o rolamento e as características associadas. Ainda nesta seção, são descritas as transformadas wavelet (TW) e Hilbert-Huang (THH), que são utilizadas na etapa de processamento de sinais. Em seguida descreve-se uma máquina de vetor de suporte (MVS) e uma rede neural artificial (RNA) para a etapa de diagnóstico.

Na seção 3, definem-se as bases de dados, as medidas estatísticas e os parâmetros dos algoritmos de IA. Na seção 4 apresentam-se os resultados obtidos na identificação de avarias dos rolamentos, com desempenho superior a 96% em todos os algoritmos, por último as principais conclusões encontram-se na seção 5.

## 2 | BASE TEÓRICA

### 2.1 Avarias em rolamentos

No momento em que um MIT gira com uma avaria no rolamento, surgem frequências associadas, que são percebidos nas correntes do rotor e do estator. A Figura 2, apresenta um rolamento, onde se encontram representados os detalhes geométricos necessários, para descrever as equações do funcionamento e as frequências típicas que estão associadas às avarias (Rao et al., 2019).

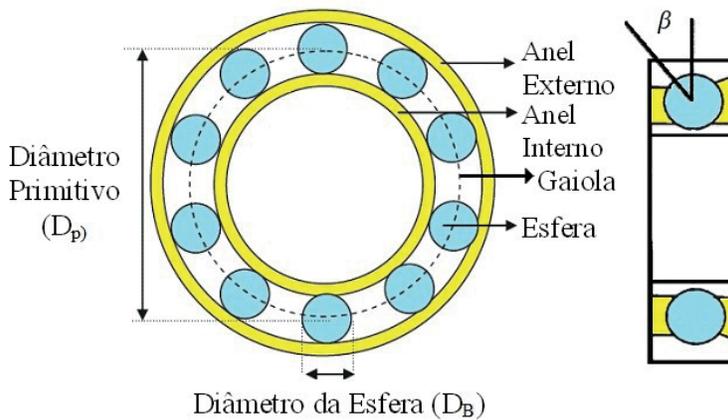


Figura 2: Detalhes geométricos de um rolamento com 10 esferas.

No trabalho de (Silva and Cardoso, 2005a; Silva and Cardoso, 2005b), encontram-se os detalhes para a obtenção das (1), (2), e (3), as avarias nas pistas externas, interna e ainda nas esferas.

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (1)$$

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (2)$$

$$f_b = \frac{D_b}{D_t} f_r \left( 1 - \frac{D_B^2}{D_p^2} \cos^2 \beta \right) \quad (3)$$

onde:

$f_o$  frequência típica da pista externa (Hz);

$f_i$  frequência típica da pista interna (Hz);

$f_b$  frequência típica das esferas (Hz);

$f_r$  frequência de rotação do motor (Hz);

$D_p$  diâmetro primitivo (mm);

$D_b$  diâmetro da esfera (mm);

$N_b$  número de esferas;

$\beta$  ângulo de contato.

O trabalho de (Bessous et al., 2018), propõe que as equações 1 e 2, podem ser aproximadas pelas (4) e (5), para rolamentos de 6 a 12 esferas que são encontrados na maioria das aplicações.

$$f_o = 0.4N_b f_r \quad (4)$$

$$f_i = 0.6N_b f_r \quad (5)$$

## 2.2 Transformada wavelet

A transformada de Fourier (FT) é utilizada na etapa de processamento de sinais, para adquirir informações de sinais estacionários, no domínio da frequência. Adaptações nesta transformada, como a Short-Time Fourier Transform (STFT), permite a utilização de uma janela de amostragem fixa, que localiza as informações no domínio do tempo-frequência em resolução constante (Aimer et al., 2019).

Em muitas aplicações, a utilização da STFT torna-se inadequada, pois os sinais de corrente do MIT em condição de avaria, apresentam variações dinâmicas na frequência que caracterizam um sinal não-estacionário. (Bessous et al., 2018). Para o processamento de sinais não-estacionários, utilizam-se transformadas em multiresolução que constroem janelas de amostragem de largura variável, no domínio do tempo-frequência (Kamiel and Howard, 2019).

Nesse contexto, a transformada wavelet consegue atender à necessidade de multiresolução, para processamento de sinais não-estacionários no domínio tempo-frequência, pois esta transformada possibilita a utilização de janelas de amostragem de largura variável, de acordo com cada evento no tempo (Gupta et al., 2019). A (6) expressa o produto interno entre o sinal amostrado e a wavelet.

$$\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

em que  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  denota o produto interno, a função  $\psi$  é a wavelet, os parâmetros  $a$  e  $b$  são os fatores de escalonamento e translação. A alteração do parâmetro  $a$ , possibilita o escalonamento das janelas de amostragem do sinal  $f(t)$ .

Para uma função  $\psi_{a,b}$  ser definida como wavelet, ela deve pertencer ao espaço  $L^2$  (espaço das funções integráveis em Lebesgue, em que o seu quadrado também seja), possuir regularidade e energia finita conforme as (7) e (8).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (8)$$

## 2.3 Transformada wavelet discreta

A transformada wavelet discreta (TWD) da função  $\psi_{a,b}$ , é obtida ao definir que os parâmetros  $a$  e  $b$  são inteiros em um intervalo fechado. Ao fazer com que o parâmetro  $b$  seja dependente de  $a$ , chega-se a expressão de uma wavelet  $\psi_{m,n}$  com fatores de escalonamento e translação inteiros, conforme (9) e (10), onde  $m$  e  $n$  são inteiros que devem ser escolhidos de acordo com a forma da wavelet.

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (9)$$

$$DWT_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a^m}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) \psi\left(\frac{w(t)}{a_0^m}\right) \quad (10)$$

onde:

$$w(t) = t - nb_0 a_0^m \quad (11)$$

### 2.3.1 Interpretação da wavelet

O produto interno entre o sinal  $f(t)$  e a wavelet  $\psi_{a,b}(t)$ , produz coeficientes que constituem um sinal transformado (S). Este sinal é decomposto através de filtros passa-alta e passa-baixa, para gerar dois novos sinais, que contém o conjunto de coeficientes  $g[k]$  (passa-alta) e  $h[k]$  (passa-baixa) (Bayro-Corrochano, 2019).

Para construção destes filtros, o parâmetro de escalonamento é redefinido para uma função  $\phi(t)$ , que depende dos coeficientes da filtragem  $h[k]$  conforme (12). A função  $\psi_{a,b}(t)$  é redefinida para depender da função de escalonamento e de  $g[k]$ , conforme a (13) (Gupta et al., 2019).

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h[k] \phi(2t - k) \quad (12)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g[k] \phi(2t - k) \quad (13)$$

Desta forma, o sinal S é dividido em duas bandas de filtragem, onde a banda passa-baixas (LP), é formada pelo sinal  $h[k]$  e recebe o nome de coeficientes de aproximação (cA). A banda passa-altas (HP), é formada por  $g[k]$  e recebe o nome de coeficientes dos

detalhes (cD) (da Silva Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2021).

A decomposição em multiresolução, consiste em utilizar o cA do sinal S, em sucessivas transformadas DWT, com a finalidade de extrair diversos níveis de detalhes, conforme a Figura 3.

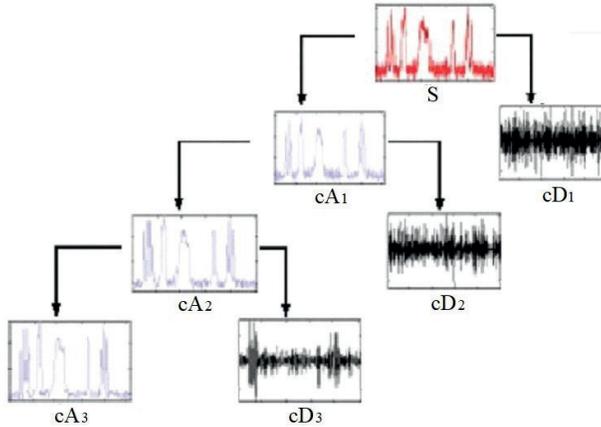


Figura 3: Decomposição do sinal amostrado S em três níveis de Aproximações e Detalhes

Torna-se necessário definir o último nível em que a decomposição cD extrai detalhes do sinal amostrado, sem redundância da informação. Os teoremas explicados em (Bessous et al., 2019) e (Ghods and Lee, 2016) definem um critério de finalização para a decomposição sucessiva, conforme (14).

$$N = \text{int} \left[ \frac{\log \left( \frac{f_a}{f_f} \right)}{\log(2)} \right] + 1 \quad (14)$$

Onde N é o nível máximo de detalhamento,  $f_a$  é a frequência da amostragem e  $f_f$  é a frequência do motor. Evidencia-se que os níveis cD, dependem da taxa de amostragem.

### 2.3.2 Wavelets de Daubechies

As wavelets propostas por Daubechies em seu trabalho original (Daubechies, 1988), são funções  $\psi(t)$  em bases ortonormais, com suporte compacto, regularidade e número máximo de momentos nulos (Gupta et al., 2019). A Figura 4 apresenta a wavelet de Daubechies de ordem N=12 (D12), com N/2 = 6 momentos nulos e suporte compacto N-1 = 11.

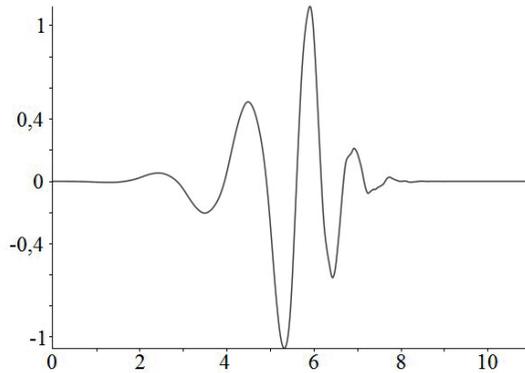


Figura 4: Esboço de uma wavelet D12

Observa-se que a D12 possui máximo e mínimo definidos, energia finita, limita-se ao suporte e tem média zero, conforme (7) e (8). O momento nulo, relaciona-se com a suavidade da resposta em frequência e a capacidade de representar polinômios. Para definir a existência de  $k$  momentos nulos, a (15) deve ser satisfeita (Narendiranath et al., 2017).

$$\int x^k \psi(x) dx = 0 \quad (15)$$

As propriedades que determinam a escolha de wavelets de Daubechies, são a ortogonalidade, máximo e mínimo definidos e a quantidade máxima de momentos nulos em suporte compacto. Por definição, suporte compacto é um intervalo fechado que contém toda a energia da função. Fora deste intervalo a energia deve ser zero ou exponencialmente decrescente (Narendiranath et al., 2017).

## 2.4 Transformada de Hilbert-Huang

A transformada de Hilbert-Huang (HHT) decompõe um sinal amostrado no plano complexo e torna-se adequada para sinais não-estacionários (Bessous et al., 2019), onde se utilizam (16) e (17) para a obter HHT do sinal ( $s$ ).

$$H(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (16)$$

$$z(t) = s(t) + iH(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (17)$$

onde  $H(t)$  é a HHT,  $i$  é o número imaginário e  $P$  representa o valor principal de Cauchy.

Para calcular a HHT, utiliza-se uma técnica denominada *Empirical Mode Decomposition* (EMD) desenvolvida por Huang e demais pesquisadores (Bessous et al., 2019). Inicialmente, calculam-se os extremos, a média e a função de interpolação de duas

curvas envolventes do sinal amostrado  $s(t)$  no domínio do tempo, conforme a Figura 5.

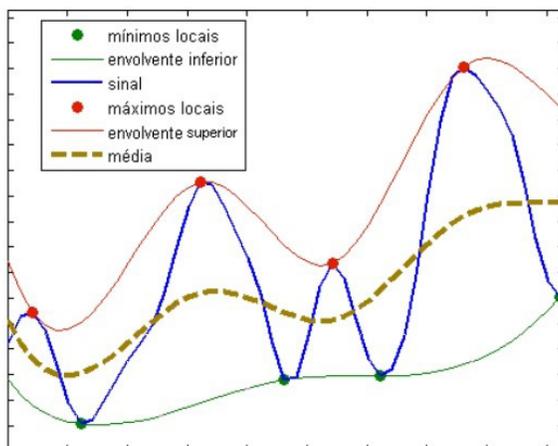


Figura 5: Esboço das envoltórias interpoladas para a EMD

Em seguida, ajusta-se iterativamente a interpolação das envoltórias em cada ponto de máximo e mínimo local, através de um algoritmo denominado *sifting*, com a finalidade de obter funções conhecidas como *Intrinsic Mode Functions* (IMF). Uma função é definida como IMF de um sinal  $s(t)$ , quando a quantidade de zeros, máximos e mínimos são iguais, ou diferem de uma unidade e as duas curvas envolventes possuem média nula em cada ponto. A Figura 6, apresenta um exemplo de IMF's geradas e o resíduo das interpolações somadas.

Após a obtenção das IMF's, calcula-se a HHT com a finalidade de obter o espectro do sinal no domínio do tempo-frequência. Importa ressaltar que cada IMF contém parte da informação do comportamento do sinal e pode ser utilizada diretamente pelos algoritmos de IA sem que seja necessário calcular a HHT conforme é proposto na seção 3 deste trabalho.

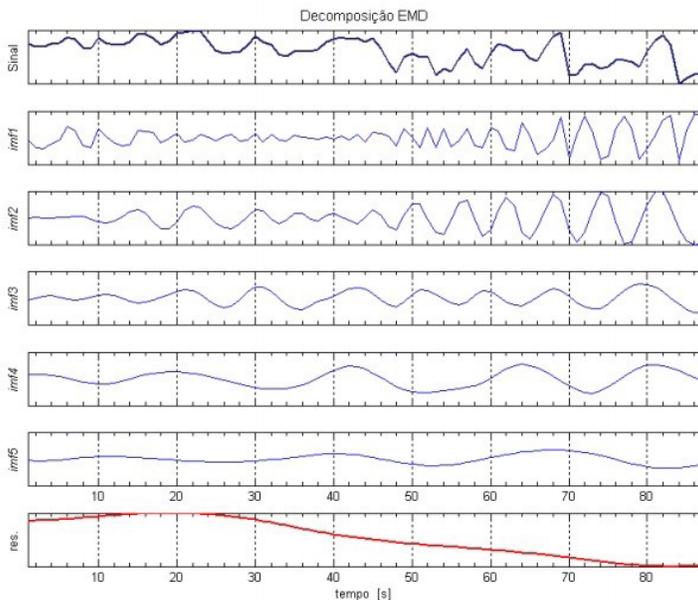


Figura 6: Decomposição de um sinal, IMF's e resíduo em vermelho

## 2.5 Rede Neural Artificial

A rede neural artificial (RNA) é uma ferramenta da IA, que estabelece relações não-lineares entre entrada e saída (Witten et al., 2016). Espera-se que a RNA aprenda, através do processo iterativo de ajustes de pesos com minimização de erros de classificação dentro de um critério de finalização (Yegnanarayana, 2009).

## 2.6 Máquina de Vetor Suporte

Um algoritmo de máquina de vetor suporte (MVS) desenvolve hiperplanos de complexidade ajustável, com a finalidade de classificação de dados. Desta forma, a MVS é utilizada como classificador multivariável, regressor e identificador de outliers (Smola and Scholkopf, 2004).

Os hiperplanos criados estabelecem uma margem de separação para classificação das instâncias da base de dados e posterior generalização. A utilização de um kernel permite que a MVS encontre hiperplanos de separação, através de uma transformação não-linear de um espaço de alta dimensionalidade (Witten et al., 2016).

## 3 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho utiliza quatro bases de dados abertas, elaboradas pela Chair of Design and Drive Technology da Universidade de Paderborn na Alemanha, para análise de avarias em rolamentos. O trabalho de (Lessmeier et al., 2016) explica como foram realizados os testes e a classificação das bases.

A base de dados K002, contém um motor íntegro e será utilizada na comparação com as bases de motores com avarias em rolamentos. Na base KA07, encontra-se um rolamento avariado com furo pontual, localizado na pista externa, com diâmetro da avaria menor que 2mm.

As bases KI04 e KA08 apresentam um rolamento com corrosão pontual, com diâmetro de avaria menor que 2mm, na pista interna e externa respectivamente. Por último, a base KI18 contém um rolamento com corrosão pontual, com diâmetro de avaria menor que 4mm, na pista interna. Aplica-se a TWD D20, a fim de gerar 6 sinais de detalhes e a EMD para calcular 6 IMF's.

Em seguida, extraiu-se a média, média harmônica, curtose, antissimetria e entropia dos sinais transformados. Na MVS, utilizou-se o kernel gaussiano (g-MVS) e o polinomial de ordem  $p$  [1, xy,x,y] $p$  (p-MVS). Para o fator complexidade, variou-se exponencialmente o parâmetro  $c$  na base 2, até que as classificações atingissem desempenho acima de 96%.

A RNA, inicialmente contém apenas 1 camada oculta, com 12 neurônios e algoritmo de retropropagação do erro. Para os testes, limitou-se a 1000 épocas, com taxa de aprendizagem entre 0,32 e 0,10, momento entre 0,2 e 0,1, tempo de computação de 0,15 horas e regularização Lasso. Realizaram-se alterações na arquitetura da rede, limitadas entre 8 e 16 neurônios na camada oculta.

A seguir, mostram-se os resultados na comparação entre o motor íntegro e o motor com avaria, com os algoritmos wavelet-MVS, wavelet-RNA, EMD-MVS e EMD-RNA. Percebe-se que o treino das redes somente com IMF's, sem efetuar a transformada de Hilbert, apresenta um resultado relevante.

## 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

A concatenação da base de dados (K002, KA07, KI04, KA08 e KI18) gera 20000 instâncias. A Tabela 2, apresenta o desempenho da TWD D20, com 6 decomposições de detalhes em 5 características (30 variáveis).

	KA07	KA08	KI04	KI18
NA	0,991	0,966	0,962	0,984
p-MVS	0,986	0,974	0,986	0,971
g-MVS	0,970	0,961	0,961	0,975

Tabela 2: Desempenho de classificação com wavelet Daubechies de ordem 20

As classificações com a MVS em kernel gaussiano (g-MVS) apresentam desempenho inferior aos demais. Os algoritmos RNA e a MVS com kernel polinomial  $p = 1$ , (p-MVS) convergem o treino na ordem de 100 segundos. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos

com as 6 IMF's e as mesmas características extraídas (30 variáveis).

Ao comparar as duas tabelas, percebe-se que as duas transformadas apresentam resultados semelhantes. Observa-se que as avarias acentuadas, relacionadas nas bases de dados KA07 e KI18 são classificadas com desempenho superior. Com isto é possível monitorar a tendência de aumento ou degradação de uma avaria, à medida que uma classificação melhora em desempenho.

	KA07	KA08	KI04	KI18
RNA	0,984	0,998	0,982	0,984
p-MVS	0,988	0,987	0,990	0,991
g-MVS	0,963	0,964	0,978	0,975

Tabela 3: Desempenho de classificação através da EMD e IMF's

## 5 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta as bases para a análise de avarias em rolamentos e duas transformadas de sinais não-estacionários, que são a wavelet discreta de Daubechies e a EMD de Hilbert-Huang. Propõe cinco características que devem ser extraídas destes sinais e utiliza uma rede neural artificial e máquinas de vetor de suporte para diagnóstico de avarias.

No final deste trabalho, apresentam-se os resultados obtidos pela classificação e conclui-se que, após os ajustes necessários, é possível classificar as avarias em rolamentos utilizando-se os sinais de corrente elétrica do motor, com desempenho na ordem de 98% de acertos. Sem dúvida, as ferramentas de inteligência artificial podem ser aplicadas na área de manutenção preditiva.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional para a Competitividade e a Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projecto POCI-01-0145-FEDER029494, e por Fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito dos Projectos PTDC/EEI-EEEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020. Os autores agradecem ainda à Petrobras Transporte S.A.

Este trabalho é dedicado ao co-autor André da Silva Barcelos (in memoriam), por todo seu empenho no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AIMER, Ameer Fethi et al. **Bearing fault diagnosis of a PWM inverter fed-induction motor using an improved short time Fourier transform.** Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 14, n. 3, p. 1201-1210, 2019.

BARCELOS, Andre S.; CARDOSO, Antonio J. Marques. **Current-Based Bearing Fault Diagnosis Using Deep Learning Algorithms.** Energies, v. 14, n. 9, p. 2509, 2021.

BARCELOS, André S.; MAZZONI, Fábio Muniz.; CARDOSO, Antonio J. Marques. **Análise De Avarias Em Rolamentos, Utilizando Algoritmos De Inteligência Artificial.** Congresso Brasileiro de Automática, v. 2, n. 1, 2020.

BAYRO-CORROCHANO, Eduardo. **Applications of Lie Filters, Quaternion Fourier, and Wavelet Transforms.** In: Geometric Algebra Applications Vol. I. Springer, Cham, 2019. p. 489-517.

BESSOUS, N.; SBAA, S.; MEGHERBI, A. C. **Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques.** Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, p. 571-582, 2019.

BESSOUS, N. et al. **Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform.** International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 9, n. 2, p. 335-343, 2018.

CARDOSO, António João Marques. **Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos.** 1991. Universidade de Coimbra.

CERRADA, Mariela et al. **A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 99, p. 169-196, 2018.

DA SILVA BARCELOS, André; MAZZONI, Fábio Muniz; CARDOSO, António João Marques. **Análise de avarias em rolamentos, utilizando algoritmos de inteligência artificial.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 29080-29093, 2021.

DAUBECHIES, Ingrid. **Orthonormal bases of compactly supported wavelets.** Communications on pure and applied mathematics, v. 41, n. 7, p. 909-996, 1988.

FINK, Olga. **Data-driven intelligent predictive maintenance of industrial assets.** In: Women in Industrial and Systems Engineering. Springer, Cham, 2020. p. 589-605.

GHODS, Amirhossein; LEE, Hong-Hee. **Probabilistic frequency-domain discrete wavelet transform for better detection of bearing faults in induction motors.** Neurocomputing, v. 188, p. 206-216, 2016.

GILCHRIST, Alasdair. **Industry 4.0: the industrial internet of things.** Apress, 2016.

GUPTA, Kanika et al. **Daubechies wavelets: Theory and Applications.** 2019. Tese de Doutorado.

KAMIEL, Berli Paripurna; HOWARD, Ian. **Ball bearing fault diagnosis using wavelet transform and principal component analysis.** In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019. p. 050031.

KOBBACY, Khairy Ahmed Helmy; MURTHY, DN Prabhakar (Ed.). **Complex system maintenance handbook**. Springer Science & Business Media, 2008.

LESSMEIER, Christian et al. **Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification**. In: Proceedings of the European conference of the prognostics and health management society. 2016. p. 05-08.

MERIZALDE, Yuri; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; DUQUE-PEREZ, Oscar. **State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors**. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 1056, 2017.

NARENDIRANATH, Babu T. et al. **Journal bearing fault detection based on Daubechies wavelet**. *Archives of Acoustics*, v. 42, 2017.

PAOLANTI, Marina et al. **Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0**. In: 2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2018. p. 1-6.

RAO, S. Ganesh et al. **Fault Analysis of Induction Motor**. In: 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). IEEE, 2019. p. 1-4.

SILVA, José LH; CARDOSO, AJ Marques. **Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach**. In: 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. IEEE, 2005. p. 6 pp.

SILVA, José LH; CARDOSO, AJ Marques. **Diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos**. Universidade de Coimbra, 2005.

SMOLA, Alex J.; SCHÖLKOPF, Bernhard. **A tutorial on support vector regression**. *Statistics and computing*, v. 14, n. 3, p. 199-222, 2004.

WITTEN, I. H. et al. **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques**. Hamilton, ON: University of Waikato. 2016.

YEGNANARAYANA, Bayya. **Artificial neural networks**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.

## MÉTODOS MATEMÁTICOS DE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO: LÓGICA FUZZY

*Data de aceite: 01/07/2021*

### **Joelson Lopes da Paixão**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Santa Maria - RS, Brasil

### **Aizenira da Rosa Abaide**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Santa Maria - RS, Brasil

**RESUMO:** A Lógica Fuzzy ou difusa é uma ferramenta desenvolvida para a análise de problemas, em que as variáveis não apresentam comportamento binário (zero ou um) e esse intervalo deve ser considerado. Logo, o presente trabalho tem por objetivo apresentar um breve histórico, a metodologia de modelagem e aplicações da Lógica Fuzzy. Assim, será mostrado como surgiram os Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF), seus principais conceitos, propriedades e aplicações na ciência, com foco na engenharia elétrica. Além da parte conceitual e teórica, é apresentado um exemplo de estudo de caso, no qual a lógica fuzzy serve de ferramenta para modelagem e resolução do problema.

**PALAVRAS - CHAVE:** Lógica Fuzzy, Variáveis não Binárias, SIF.

**ABSTRACT:** Fuzzy logic is a tool developed for the analysis of problems, in which the variables

do not present binary behavior (zero or one) and this interval must be considered. Therefore, the present work aims to present a brief history, the modeling methodology and applications of Fuzzy Logic. Thus, it will be shown how the Fuzzy Inference Systems (FIS) emerged, their main concepts, properties and applications in science, with a focus on electrical engineering. In addition to the conceptual and theoretical part, an example of a case study is presented, in which the fuzzy logic serves as a tool for modeling and solving the problem.

**KEYWORDS:** Fuzzy Logic, Non-Binary Variables, FIS.

## 1 | INTRODUÇÃO

A lógica Fuzzy é uma ferramenta de otimização baseada nos princípios da Inteligência Artificial. Foi desenvolvida com o princípio de criar um espaço de classificação entre o “0” e o “1”, o verdadeiro ou falso, o pertence ou não pertence, definido pela lógica tradicional de Aristóteles. Foi proposta por Lotfi Asker Zadeh, que publicou um artigo em 1965, visando resolver paradigmas lógicos até então de difícil solução devido ao aumento do uso de sistemas informatizados e o tratamento de dados com menor linearidade [1].

Comumente utilizada em estudos que englobam incertezas e variações não-binárias dos parâmetros em questão, a lógica difusa pode servir, por exemplo, de instrumento para

estipular cenários prováveis, com diferentes níveis de entrada da Geração Distribuída (GD), sistemas de controle e automação, tomadas de decisão em sistemas nebulosos [2], [3]. Por ser um sistema especialista, com variação não-binária das variáveis de entrada e saída (que são descritas por funções de pertinência), pode-se determinar qualitativa ou quantitativamente uma zona de classificação contínua [4]. Portanto, pode-se desenvolver um Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) sabendo como cada variável de entrada afeta individualmente a saída, partindo da combinação dos graus de pertinência, ou seja, na fuzzificação de todas as variáveis de entrada. Por meio de um conjunto de regras é modelada a contribuição das variáveis de entrada e, então se estima a saída do SIF, chamada de defuzzificação [1].

Os SIFs vêm ao longo dos anos servindo como ferramenta para trabalhar com as imprecisões [5]. Desse modo, a lógica fuzzy é uma maneira pertinente de estruturar uma variável de entrada para uma variável de saída, de fácil entendimento, uma vez que possui uma abordagem mais intuitiva. Assim, seus conceitos são formulados com base em habilidades antigas do raciocínio humano, através da descrição qualitativa utilizada na linguagem cotidiana, que foi moldada para ser conveniente e eficiente. Sendo caracterizada pela tolerância a dados imprecisos, pois seu raciocínio constrói o entendimento do processo em vez de focar em uma solução final [6].

Tanto os sistemas especialistas, como também os baseados na inteligência artificial são ferramentas importantes, pois podem lidar com ambientes de informação imperfeita e, portanto, pode reduzir os requisitos de comunicação e processamento de dados [7]. Na literatura, frequentemente são encontrados estudos que utilizam puramente a lógica fuzzy ou mesmo sistemas híbridos, com fuzzy trabalhando em conjunto às redes neurais, para prever o montante de energia proveniente da GD ou estimar locais/tamanhos de implantação de sistemas de geração descentralizados. Além disso, conforme dado por [8], as aplicações do SIF nas engenharias são diversas, tais como nas seguintes situações:

- Quando se tem variação de parâmetro(s) que pode ser compensada com julgamento do projetista;
- Processos que podem ser modelados linguisticamente, mas não matematicamente;
- Estabelecimento com o objetivo de melhorar a eficiência como uma questão de julgamento do operador;
- Quando o sistema depende das habilidades e atenção do operador;
- Sempre que um parâmetro do processo afeta outro parâmetro do processo;
- Efeitos que não podem ser obtidos por controle proporcional-integral-derivativo (PID) separados;
- Sempre que um controlador difuso puder ser usado como consultor do operador humano;

- Modelagem intensiva de dados (uso de regras paramétricas);
- Variação de parâmetros: temperatura, densidade, impedância;
- Não linearidades, banda morta e atraso de tempo;
- Dependência cruzada de variáveis de entrada e saída.

Todo design começa com o processo de pensar, isto é, uma criação mental, onde as pessoas usarão sua formulação linguística, com suas análises e declarações lógicas sobre suas ideias. Então, vagueza e imprecisão são consideradas fenômenos empíricos. Cientistas e engenheiros tentam remover a maior parte do vago e da imprecisão do mundo, fazendo formulações matemáticas precisas usando leis da física, química e natureza em geral. Às vezes, é possível ter modelos matemáticos precisos, com fortes restrições sobre não-idealidades, variação de parâmetros e comportamento não-linear. Mas é muito comum que modelos precisos sejam muito difíceis de construir usando formulação matemática [8].

De modo geral, verifica-se que técnicas difusas e neuro-difusas se tornaram ferramentas eficientes em aplicações de modelagem e controle. Há vários benefícios em otimizar a relação custo-benefício, pois a lógica nebulosa é uma metodologia para lidar com informações inexatas, imprecisas, qualitativas, nebulosas e verbais de maneira sistemática e rigorosa, como temperatura, velocidade do vento, umidade e pressão. Nesses casos, a lógica fuzzy pode representar uma alternativa na modelagem e solução de problemas complexos.

## 2 | SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY (SIF)

A lógica Fuzzy se ajusta com a forma do pensamento humano, pois esse intervalo gera uma margem de “raciocínio”. Por exemplo, no caso de uma caixa de madeira, para lógica tradicional, ou ela está vazia ou está cheia. Já no contexto da lógica Fuzzy, ela pode estar vazia, cheia, quase cheia, meio cheia. Determina-se uma zona de classificação, qualitativa ou quantitativamente contínua, ao contrário dos valores discretos da lógica tradicional [4]. Um sistema de inferência Fuzzy é composto por 5 blocos funcionais, correspondentes a 3 etapas, como mostrado na Fig. 1.

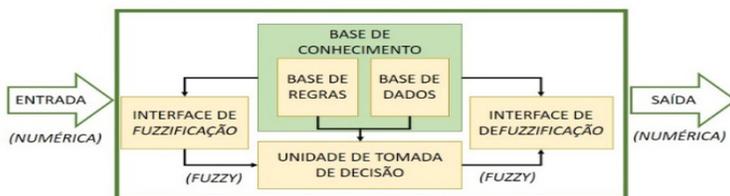


Fig. 1. Etapas de um Sistema de Inferência Fuzzy.

Fonte: Adaptado de: [9].

No primeiro estágio, os dados de entrada passam pelo processo de inserção no sistema de inferência Fuzzy, denominado como fuzzificação. Cada valor de entrada é representado como um grau de pertinência nas funções ao qual o mesmo integra, e não como um valor absoluto. Um exemplo gráfico disso é mostrado na Fig. 2, onde se tem uma função de pertinência triangular à esquerda e à direita o resultado da fuzzificação, para a variável de entrada (idade) igual a 18 anos.

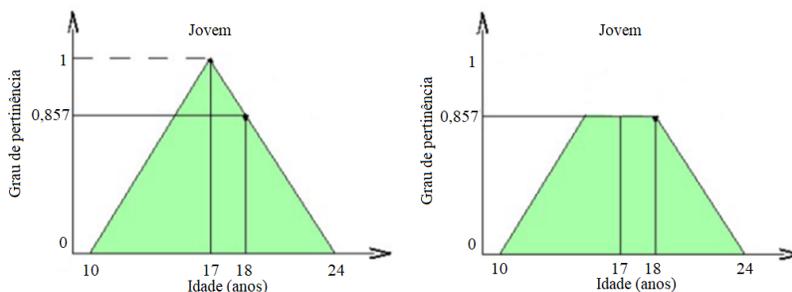


Fig. 2. Exemplo do processo de fuzzificação.

Fonte: Adaptado de: [10].

A segunda etapa do raciocínio Fuzzy corresponde ao processo de formulação e resolução das regras de inferência. Esse processo indica a maior semelhança entre a lógica Fuzzy e a lógica tradicional. Nesse sentido, introduz-se o conceito de *Modus Ponens*, uma série de argumentos dedutivos, utilizados mesmo com premissas incertas, que gera conclusões relacionadas a essas premissas [4]. Tais regras são do tipo: Se X então Y ou Se X e Y então Z.

Há alguns controladores dos sistemas de inferência, como o Mamdani e o Sugeno. No controlador Mamdani as regras são do tipo: se x é A e y é B então z = C (A, B e C são conjuntos Fuzzy). Enquanto que no controlador Sugeno as regras são do tipo: se x é A e y é B então z = f(x, y). O consequente da regra é uma função não Fuzzy das variáveis de entrada, em geral um polinômio [11]. Na Fig. 3 e Fig. 4 são mostrados exemplos dos SIFs, com controladores do tipo Mamdani e Sugeno, respectivamente. As funções de pertinência  $\mu_{A1}$ ,  $\mu_{A2}$ ,  $\mu_{B1}$  e  $\mu_{B2}$ , a partir das quais são formuladas as regras, podem ser de diferentes formatos, conforme a aplicabilidade desejada no trabalho.

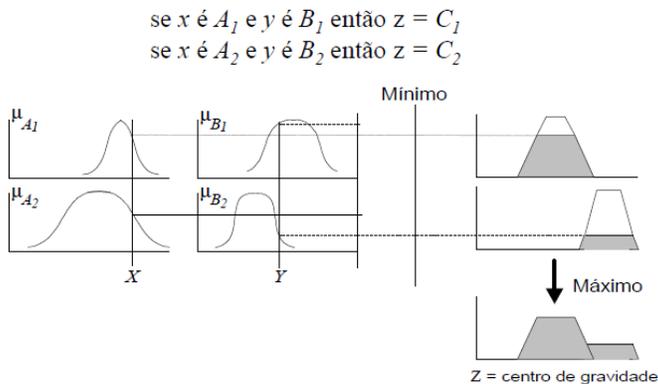


Fig. 3. Exemplo de SIF com controlador Mamdani [11].

#### Modelo Sugeno de primeira ordem

se  $x$  é  $A_1$  e  $y$  é  $B_1$  então  $z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

se  $x$  é  $A_2$  e  $y$  é  $B_2$  então  $z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

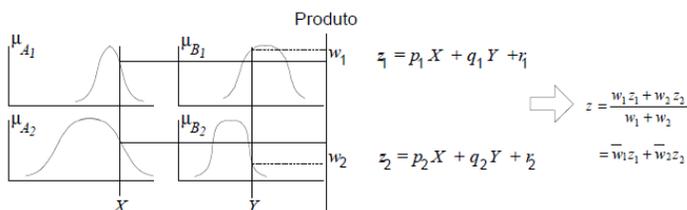


Fig. 4. Exemplo de SIF com controlador Sugeno [11].

Um controlador Fuzzy, de forma geral, realiza a relação entre cada variável dentro de uma regra e também a agregação das diferentes regras. Os controladores Mamdani são os mais comumente encontrados na literatura e possuem características adequadas a este trabalho, como a praticidade de implementação e a possibilidade de acompanhamento e manipulação das regras do algoritmo. É caracterizado, também, pelo fato de as relações difusas ocorrerem tanto nos antecedentes (parte das condições) quanto nos consequentes (parte das conclusões) das regras [12].

Embora os sistemas Fuzzy baseados no conhecimento do especialista sejam bastante efetivos, há alguns cuidados a se tomar, principalmente quando o número de regras é muito elevado. O primeiro deles é que o sentido das regras é muito rígido, uma vez que elas refletem o conhecimento existente. Isto significa que em alguns casos uma calibração dos conjuntos Fuzzy pode ser necessária para que sua semântica capture ao máximo a especificidade do problema. Outro cuidado é quanto à qualidade das regras.

A construção das regras pode ser tarefa muito difícil em problemas maiores, visto que o número de regras é definido por  $N = p^n$  onde  $n$  é o número de variáveis de entrada e  $e$

o número de conjuntos linguísticos de cada uma. A qualidade das regras pode se deteriorar nestes casos. Logo, é necessária atenção a dois pontos: a plenitude de cobertura de todos os conjuntos Fuzzy por regras e a consistência dessas regras. A TABELA I mostra algumas diretrizes relativas à consistência entre regras ao elaborá-las.

	<b>Conclusões similares</b>	<b>Conclusões distintas</b>
<b>Condições similares</b>	Regra são redundantes	Regras estão em conflito
<b>Condições distintas</b>	Regras distintas, talvez possam ser fundidas	Regras diferentes

Tabela I Consistências entre condições e conclusões de regras Fuzzy.

Fonte: Adaptado de: [5].

O controlador Mamdani realiza esta tarefa através de uma técnica gráfica. Devido à sua versatilidade, pode ser implementado em algumas variações, de acordo com os diferentes métodos de inferência possíveis, entre os quais os mais comuns são a composição máximo dos mínimos (*max-min*) e a composição máximo dos produtos (*max-product*) [3], [13]. Na composição máximo dos mínimos a agregação do conjunto de regras é realizada pelo operador união (operador lógico *or*). Já dentro de cada regra, as condições são relacionadas com o operador intersecção (operador lógico *and*). Esse método de fuzzificação, que é o mais difundido na literatura, é utilizado em [7], [14].

Na terceira e última etapa do raciocínio Fuzzy, a partir das funções de pertinência de entrada é feita a defuzzificação com base nas regras estabelecidas. Esse processo consiste em transformar o dado Fuzzy em um dado quantitativo novamente, ou seja, derivar da pertinência das regras ativas um dado conclusivo do SIF elaborado para a solução do problema [5], [13]. Como a saída também é composta de conjuntos Fuzzy, o valor quantitativo final pode ser obtido através de um método gráfico para problemas simples ou de forma matemática. Dentre as possibilidades estão o método do centroide (centro de gravidade), a média aritmética e o método da disjunção [4], [15]. De acordo com [12], o método centroide é o mais usual e fisicamente atraente de todos os métodos de defuzzificação. Na Fig. 3 foi exemplificado pela letra Z o método centroide, enquanto o método da média aritmética foi exemplificado, também pela letra Z, na Fig. 4.

Para trabalhar com SIFs, atualmente, existem aplicativos e *softwares* que dispõem dos recursos necessários para a modelagem dos sistemas nebulosos. No meio científico, um programa que é comumente utilizado pelos pesquisadores é o Matlab® [3]. Este *software* se destaca por se tratar de uma ferramenta matemática bastante completa, permitindo ao usuário trabalhar com um gama de funções e instrumentos aplicáveis na área tecnológica [6]. O *software* Matlab possui uma caixa de ferramentas (*toolbox*) completa para modelar e avaliar problemas a partir da lógica fuzzy. Esta *toolbox* é facilmente acessada por meio

do comando fuzzy, na janela de comandos do programa. Na Fig. 5 é mostrado um resumo dos elementos que compõem um SIF e as funcionalidades presentes nessa caixa de ferramentas.

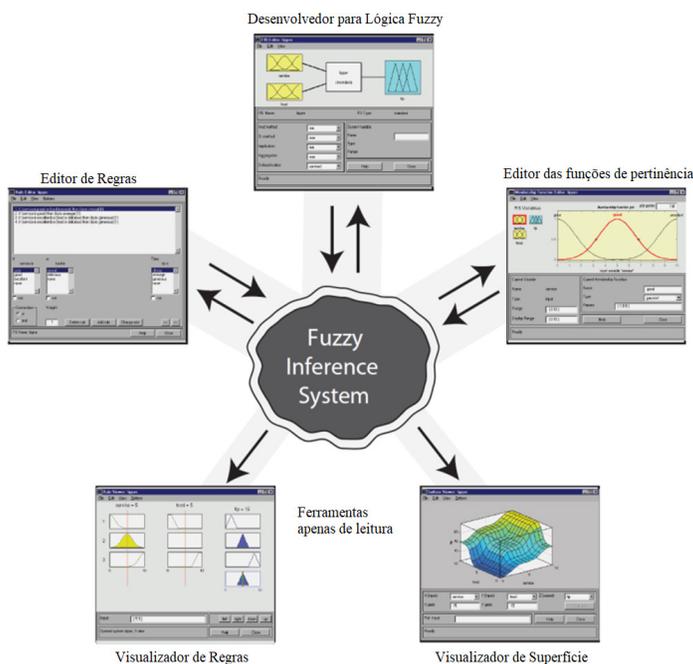


Fig. 5. Visão geral da caixa de ferramentas para os SIFs e seus recursos no Matlab [6].

A caixa de ferramentas possui um conjunto de recursos para a confecção e a edição de SIFs, tais como: o desenvolvedor do SIF, o editor de parâmetros das funções de pertinência e o editor de regras que regem a relação dos conjuntos de entrada e saída do SIF. Para verificar os resultados do sistema, têm-se o visualizador regras e o de superfície. No primeiro, com base nas regras estabelecidas, pode-se constatar como a variação das entradas influencia saída, já no segundo é mostrada uma superfície tridimensional, que mapeia o comportamento da saída em função das variações das funções de entrada.

No total, a caixa de ferramentas possui 11 formatos padronizados para as funções de pertinência, dos quais 5 são exemplificados na Fig. 6. Os tipos mais populares são os formatos triangulares, trapezoidais, gaussianas, de sino e sigmoide.

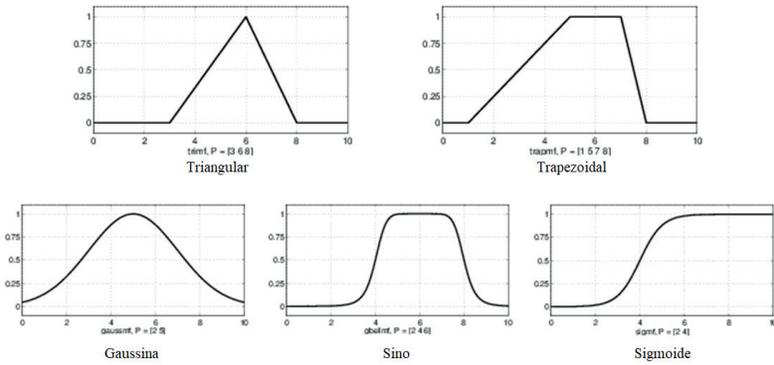


Fig. 6. Formato genérico de algumas funções de pertinência, presentes no Matlab [6].

As funções de pertinência triangulares e trapezoidais, amplamente difundidas na literatura técnica e são descritas, respectivamente, pelos segmentos de reta conforme dado nas equações (1) e (2) [6].

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

sendo que  $a$ ,  $m$  e  $b$  definem os vértices do triângulo.

Os pontos  $a$  e  $b$  representam os limites, inferior e superior, do suporte da função, sendo o suporte definido pelo conjunto de todos os elementos de  $X$  (universo de discussão) como pertinência maior que zero para o conjunto  $A$ . O ponto  $m$  é o ponto médio, no qual se apresenta a maior pertinência do conjunto, ou seja, é o ponto que mapeia elementos que pertencem completamente a esse conjunto.

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ 1, & \text{se } x \in [m, n) \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2)$$

em que  $a$ ,  $m$ ,  $n$  e  $b$  correspondem aos vértices do trapézio.

Assim como na função triangular, os pontos  $a$  e  $b$  correspondem aos limites do suporte da função, definindo o grau de pertinência 0. A diferença reside no grau de pertinência 1, o qual é delimitado pelos pontos  $m$  e  $n$  na função trapezoidal. Isso significa, em termos de classificação, que a função trapezoidal é mais generalista, pois expande para uma série de valores (definidos entre  $m$  e  $n$ ), para os quais a pertinência é plena. Pode-se

dizer ainda que a função triangular é uma particularização da função trapezoidal, na qual os pontos  $m$  e  $n$  correspondem ao mesmo valor [13].

A metodologia central da lógica difusa baseia-se em quatro conceitos: (1) conjuntos difusos: isto é, conjuntos com limites suaves; (2) variáveis linguísticas: variáveis cujos valores são qualitativa e quantitativamente descritos por um conjunto *fuzzy*; (3) distribuições de possibilidades: restrições sobre o valor de uma variável linguística imposta pela atribuição de um conjunto *fuzzy*; (4) regras *fuzzy* SE-ENTÃO: um esquema de representação de conhecimento para descrever um mapeamento funcional para uma fórmula lógica que generalizou uma implicação na lógica de dois valores [3].

### 3 | APLICAÇÃO DOS SIFS

A lógica *fuzzy* se apresenta como um recurso interessante para a previsão da integração dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV) no Sistema Elétrico de Distribuição (SED). Conforme [3], é possível estimar o interesse dos consumidores pelos SFV a partir da modelagem de fatores que propiciam ou dificultam tal interesse. Neste sentido, para determinar a probabilidade de dispersão da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) no SED, é desenvolvido um SIF baseado em 5 variáveis de entrada. Tais variáveis são: preço da energia, custo dos SFV, políticas de incentivo, atratividade dos SFV e tempo de retorno do investimento, conforme apresentado na Fig. 7.

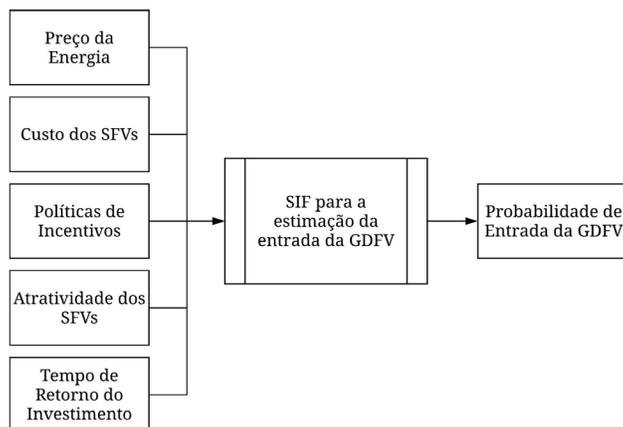


Fig. 7. SIF para determinar o percentual de entrada da GDFV.

#### A. Modelagem das Variáveis de Entrada do SIF

Para facilitar a compreensão, todas as variáveis foram normalizadas pelo valor máximo do conjunto *fuzzy*.

## 4 I PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA (\$/KWH)

A energia elétrica, consolidada como bem essencial na sociedade contemporânea, está com suas fontes de geração passando por diversas transformações no país. Houve, nos últimos anos, aumento da geração proveniente de fontes renováveis, principalmente a partir de plantas eólica e de biomassa. Passou-se também por uma intensa redução nos índices de afluência no ano de 2014, ocasionado uma crise hídrica no país. E o conceito de geração descentralizada começou a ganhar credibilidade, principalmente após o lançamento da REN 482 em 2012. Também vem-se observando, a ocorrência de consecutivos aumentos nas tarifas de energia elétrica no Brasil. Conforme dado na TABELA II, do ano 2013 ao 2017, para o consumidor residencial, o preço médio do MWh aumentou em 59% [16].

Classes	2013	2014	2015	2016	2017	$\Delta\%$ (2017/2013)
Residencial	285,24	305,35	427,89	454,33	453,56	59,0
Industrial	223,19	249,01	374,93	392,94	396,95	77,9
Comercial	269,85	293,07	415,67	444,78	446,71	65,5
Rural	167,62	184,91	257,05	266,98	278,42	66,1
Poder Público	286,11	305,97	421,51	455,18	457,97	60,1

Tabela II Tarifas Médias por Classe de Consumo (R\$/MWh).

Fonte: Adaptado de: [16].

Assim, para nortear como os SFV poderão ganhar participação entre os consumidores residenciais, tomou-se como uma das variáveis de entrada do SIF, a variável denominada *Preço da Energia Elétrica*, para qual se adotaram três subconjuntos *fuzzy*: **Baixo**, **Sem Reajustes** e **Alto**. Para essa variável é considerado um universo de análise representado pelo conjunto [0, 1,8], de modo que o valor 1 indica o preço atual, e os valores abaixo e acima de 1 indicam, respectivamente, a redução e o acréscimo percentual futuros no custo do quilowatt-hora (%\$/kWh).

No universo de análise considerado assume-se que pode haver conjuntos nos quais o *Preço da Energia Elétrica* pode tanto se reduzir ou aumentar em até 80%. Embora não se tenha perspectivas de grandes reduções na conta de energia, sabe-se que podem ocorrer consecutivos aumentos, como observado na TABELA II, em que para a classe residencial houve quase 60% de reajuste nos últimos 5 anos. Essas condições extremas são bastante difíceis de ocorrer, assim entre elas há um conjunto intermediário que modela as variações dentro de um cenário mais provável. A TABELA III exhibe os tipos de função utilizados e também os parâmetros de cada subconjunto.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixo	Trapezoidal	0,00	0,00	0,33	0,56
Sem Reajustes	Triangular	0,33	0,56	-	0,78
Alto	Trapezoidal	0,56	0,78	1,00	1,00

Tabela III Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Preço da Energia Elétrica.

Na Fig. 8 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Preço da Energia Elétrica*.

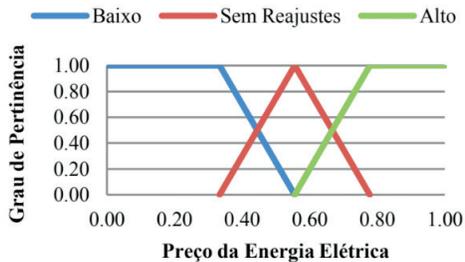


Fig. 8. Subconjuntos da variável de entrada Preço da Energia Elétrica.

## 5 | CUSTO DOS SFV (\$/WATT)

O preço do SFV, que inclui módulos fotovoltaicos, inversores e demais dispositivos de interconexão e proteção, é um fator relevante na tomada de decisão dos consumidores em adquiri-los. As boas taxas de irradiação solar observadas no território nacional, associadas à queda de preço exponencial das tecnologias ligadas à GD, tornam maiores as possibilidades de disseminação dos SFV. Um resumo da queda gradual no preço dos módulos fotovoltaicos nos últimos 38 anos é mostrado na Fig. 9. A redução do preço dos SFV deve alavancar a ascensão da quantidade de unidades consumidoras com GDFV.

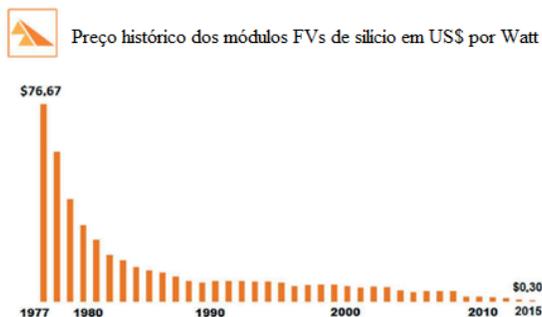


Fig. 9. Preço histórico dos módulos fotovoltaicos do ano 1977 a 2015 em US\$/W.

Fonte: Adaptado de: [17].

Feitas estas considerações para representar a influência do *Custo dos SFV* na probabilidade de entrada da GDFV, modela-se tal variável através de três subconjuntos *fuzzy*: **Redução**, **Valor Atual** e **Adição**. Para essa variável é considerado um universo de análise representado pelo conjunto  $[0, 1,5]$ , de modo que o valor 1 indica o preço atual, e os valores abaixo e acima de 1 indicam, respectivamente, um abatimento e um acréscimo percentual no preço do SFV. Na definição do universo de análise, tomou-se como referência a queda íngreme e gradual do preço dos módulos fotovoltaicos, que decaiu em 99,6%. Assim, foi considerado que se houver descontos ou incrementos no preço dos SFV de até 25%, pode-se dizer que há consolidação de uma **Redução** ou **Acréscimo**, respectivamente. A TABELA IV mostra os tipos de função utilizados e os parâmetros de cada subconjunto.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Redução	Trapezoidal	0,00	0,00	0,50	0,67
Valor Atual	Triangular	0,50	0,67	-	0,83
Adição	Trapezoidal	0,67	0,83	1,00	1,00

Tabela IV Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Custo dos SFV.

Na Fig. 10 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Custo dos SFV*.

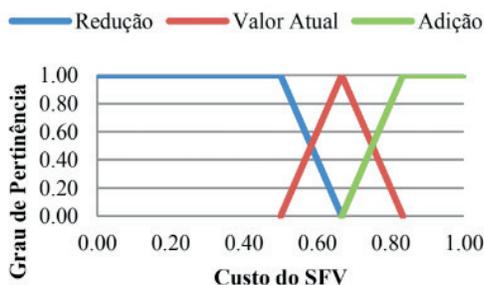


Fig. 10. Subconjuntos da variável de entrada Custo dos SFV.

## 6 | POLÍTICAS DE INCENTIVOS

O desenvolvimento e a integração das fontes de energia renováveis ao redor do mundo vêm sendo marcado pela adoção de políticas e práticas que ajudam incentivar e a viabilizar a adoção dessas fontes. Os primeiros SFV são datados da década de 80 nos EUA, em países asiáticos e em nações da União Europeia. Nestes a implantação e substituição da matriz energética, baseada em fontes poluentes, por geração limpa e

renovável já se encontra em estágio avançado em relação ao Brasil [18].

Essas nações pioneiras se destacam por terem desenvolvido investimentos governamentais em pesquisa, no mercado de produção, comercialização e implantação dos SFV. E também, pela criação e adoção de políticas que visam o incentivo e encorajamento da população na adoção de geração renovável. Algumas das políticas que se destacam são: financiamentos com taxas de juros reduzidas, pagamento de valores diferenciados por kWh gerado a partir de fontes limpas (*Feed-in Tariff*), sistema de compensação de créditos de energia injetados na rede (*Net metering*), criação de longos contratos de energia limpa com regras simples e claras para difundir a GD e torná-la competitiva no setor. Criação de financiamentos governamentais para a implantação de usinas de matriz limpa, com estabelecimento regras de redução gradual do preço pago pela energia ao longo do tempo, como maneira para auxiliar na amortização do investimento inicial [18]. A adoção de práticas para consolidar e ajudar na disseminação das fontes alternativas é essencial para que ganhem cada vez mais participação no setor energético.

No Brasil, o desenvolvimento das renováveis é mais recente, pois o país sempre apresentou condições favoráveis para geração de eletricidade, como a grande presença de rios com bom potencial para a geração hidráulica. No entanto, no decorrer dos anos, vem-se entendendo que pela sustentabilidade, preservação ambiental, aumento na demanda por eletricidade é necessário investir mais em fontes alternativas [19].

Nesse sentido, algumas políticas e práticas foram e vêm sendo desenvolvidas para estimular a entrada de SFV. Conforme [20] e [19], criou-se programas como: a Venda direta a consumidores, Descontos nas Tarifas TUST e TUSD, Programa de apoio ao desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores, Redução no imposto de renda, Condições diferenciados de financiamentos pela Caixa Econômica Federal e pelo BNDES, Fundo clima, Inova energia, alguns programas de fomento a projetos de P&D, criação do Sistema de compensação de Energia [20], [21].

Das políticas desenvolvidas, a que se mostra mais efetiva e atuante é o sistema de compensação que, com a REN 687, teve seu prazo de compensação ampliado de 36 meses para 60 meses. Entretanto, conforme muitos pesquisadores e investidores apontam os incentivos à implantação da GD ainda são deficitários no Brasil. Acredita-se que poderia haver políticas que garantissem taxas especiais para os adquirentes de SFV, mudanças na composição das taxas aplicadas à energia compensada, ou seja, aplicação dos impostos federais e estaduais (PIS, COFINS e ICMS) apenas no montante líquido de energia (energia consumida menos a gerada pelo SFV), redução de barreiras político-burocrático para as instalações de GDFV [18].

Avaliar como a presença de incentivos pode ajudar a GDFV se disseminar pelo país não é trivial. Entende-se que a maior quantidade de incentivos deve propiciar um aumento no índice de interesse pelos SFV. Entretanto, os incentivos governamentais podem, muitas vezes, terem pesos diferentes. Isto é, pode haver tipos e abrangência de incentivos que

consigam alavancar mais o desenvolvimento da GDFV do que outros. Todavia, para tornar essa variável tratável, decidiu-se segmentá-la por quantidade de incentivos. Assim, a variável de entrada *Políticas de incentivos* é representada pelo conjunto  $[0, 20]$ , o qual compreende três subconjuntos *fuzzy*: **Poucos**, **Suficientes** e **Muitos**. Dessa forma os incentivos, embora muitas vezes tenham pesos diferentes, serão avaliados no SIF pela sua quantidade. Uma vez que, inegavelmente, o crescimento dessa variável deverá estimular a ascensão da presença da GDFV nos SED.

Portanto, definiu-se que uma quantidade de *Políticas de incentivos* menor ou igual a 5 é considerada baixa. Havendo uma quantidade de incentivos maior que 5 e menor que 15, pode-se dizer que existirá um número suficiente de incentivos. Dentro desse intervalo, torna-se mais provável que ao menos algumas das políticas criadas desperte o interesse do consumidor. Definir um teto para a quantidade de *Políticas de Incentivos* implica em adotar um valor para algo imprevisível. Contudo, nesse trabalho adotou-se como 20 o número máximo de incentivos pois, a partir dessa quantidade, os impeditivos à adoção da GDFV, se ainda houver, provavelmente não serão mais políticos. Na TABELA V são mostrados os tipos de função utilizados e os parâmetros de cada subconjunto.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Poucos	Trapezoidal	0,00	0,00	0,25	0,35
Suficientes	Trapezoidal	0,25	0,35	0,65	0,75
Muitos	Trapezoidal	0,65	0,75	1,00	1,00

Tabela V Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a variável Políticas de Incentivos.

Na Fig. 11 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Políticas de Incentivos*.

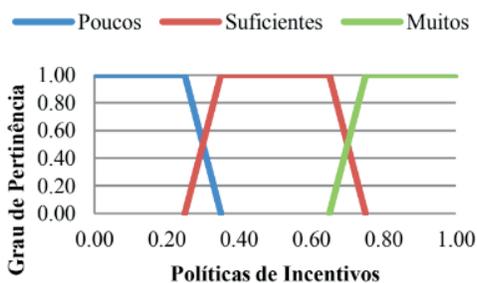


Fig. 11. Subconjuntos da variável de entrada Políticas de Incentivo.

## 7 | ATRATIVIDADE DOS SFV

A variável *Atratividade dos SFV* é uma proposta para avaliar como o SFV pode ser visto pelos consumidores, como um investimento atrativo. Essa variável é definida pela relação entre a energia gerada pelo SFV e a energia média consumida no período mensal, conforme (3):

$$FA = EMG/EMC \quad (3)$$

onde:

*FA* = Fator de Atratividade;

*EMG* = Energia Média Gerada pelo SFV mensalmente;

*EMC* = Energia Média Consumida mensalmente.

O Módulo 3 do PRODIST estabelece que mesmo com sistema próprio de geração, nesse caso o SFV, o consumidor deve pagar mensalmente uma taxa de disponibilidade de 30 kWh, 50 kWh ou 100 kWh, para ligações monofásicas, bifásicas e trifásicas, respectivamente, mais os impostos [22]. Partindo desse referencial, para a variável *Atratividade dos SFV* são definidos três subconjuntos *fuzzy*: **Pequena**, **Boa** e **Elevada**. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto [0, 1,5], ou seja, considera-se que pode haver conjuntos, nos quais o Fator de Atratividade pode ir de qualquer valor acima de zero até o valor de geração 50% maior que a média consumida. Essas condições extremas são bastante difíceis de ocorrer, assim entre elas há um conjunto intermediário que modela um cenário mais provável e considerado bom. Na TABELA VI são apresentados os tipos de funções utilizados e os parâmetros de cada subconjunto.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Pequena	Trapezoidal	0,00	0,00	0,40	0,53
Boa	Trapezoidal	0,40	0,53	0,67	0,80
Elevada	Trapezoidal	0,67	0,80	1,00	1,00

Tabela VI Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Atratividade dos SFV.

Na Fig. 12 apresentam-se os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Atratividade dos SFV*.

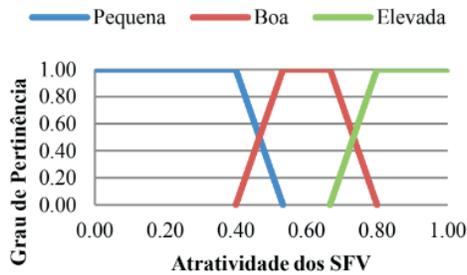


Fig. 12. Subconjuntos da variável de entrada *Atratividade dos SFV*.

## 8 I TEMPO DE RETORNO (*PAYBACK*)

Na avaliação do *payback* é imprescindível embasar a análise em dados palpáveis. Isto é, precisa-se definir um horizonte de tempo de retorno do capital investido, que torne a decisão pela aquisição dos SFV um negócio lucrativo. Deste modo, entende-se que quanto mais breve for o prazo que o SFV propiciar a quitação do investimento inicial, maiores serão as chances de disseminação da GDFV. Do ponto de vista técnico-financeiro, verifica-se que os fabricantes estimam que a vida útil dos módulos fotovoltaicos deve chegar aos 25 anos [18]. Portanto, o *Payback* só será atrativo se for menor, ao menos alguns anos, que a vida útil do sistema.

Para a variável *Payback* são definidos três subconjuntos *fuzzy*: **Curto**, **Aceitável** e **Longo**. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto  $[0, 25]$ , ou seja, considera-se que poderia haver conjuntos com até 25 anos de tempo de retorno. A TABELA VII mostra os tipos de função utilizados e os parâmetros de cada subconjunto.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
<b>Curto</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,00	0,00	0,20	0,40
<b>Aceitável</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,20	0,40	0,60	0,80
<b>Longo</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,60	0,80	1,00	1,00

Tabela VII Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável Tempo de Retorno do Investimento.

A Fig. 13 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Payback*.

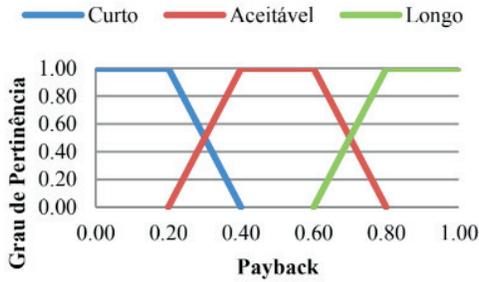


Fig. 13. Subconjuntos da variável *Payback*.

## B. Modelagem da Base de Regras do SIF

A base de regras de um sistema fuzzy de múltiplas entradas e apenas uma saída apresenta a estrutura descrita da seguinte forma, pela expressão (4):

$$SE A \text{ é } A1 \text{ E } B \text{ é } B2 \text{ ENTÃO } X \text{ é } X1 \quad (4)$$

sendo que *A* e *B* são as variáveis de entrada; *A1* e *B2* são alguns dos termos linguísticos dos subconjuntos das respectivas variáveis de entrada; e *X* e *X1* correspondem à saída e um dos termos linguísticos [13]. Sabendo que a totalidade das regras de um SIF é igual à combinação de todos os subconjuntos das variáveis de entrada, a qual é expressa pelo produto da quantidade de termos linguísticos de cada variável. Portanto, no SIF desenvolvido, como se têm 5 variáveis de entrada e cada uma é representada por 3 termos linguísticos, o número total de regras possíveis será  $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 243$ .

Para a definição do julgamento da regra, isto é, na definição do consequente, é necessário o conhecimento sobre a dinâmica do SIF. Esse conhecimento é, em muitos casos, empírico ou resultante do julgamento baseado na experiência do pesquisador e sua equipe. Desta maneira, pode-se afirmar que também não há critérios e métodos pré-definidos para a determinação do julgamento. Logo, a partir da definição das variáveis linguísticas, o pesquisador define as convenções e critérios que norteiam a avaliação. Para esse SIF, as condições e princípios que direcionam o especialista na definição das regras são:

- Para a variável *Preço da Energia Elétrica* considera-se que quanto mais baixa esta for, menos consumidores tenderão a se interessar em instalar SFV. Ou seja, haverá uma baixa probabilidade de entrada da GDFV ou percentual de inserção bastante pequeno de aderentes. O contrário a essa premissa também é verdadeiro;
- Para a variável *Custo do SFV* considera-se que quanto mais elevado esta for, menos consumidores se interessarão em adquiri-los. Ou seja, haverá uma baixa probabilidade de entrada ou percentual bastante pequeno de aderentes. O oposto dessa premissa também é verdadeiro;

- Para a variável *Políticas de Incentivos*, adota-se que quanto maior for o fomento ou quanto mais efetivas forem as práticas governamentais em relação à inserção da GDFV, mais provável será que haja sua disseminação entre os consumidores. O oposto a essa premissa também será verdadeiro;
- Para a variável *Atratividade dos SFV* diz-se que quanto mais elevada a tarifa de energia estiver e mais eficientes se tornarem às tecnologias aplicadas nos SFV, mais atrativos estes serão. Isto é, haverá mais chances da população se interessar pelo investimento na GDFV. O inverso a estas condições também será verdadeiro;
- Para a variável *Payback* tem-se que quanto menor este for, mais consumidores poderão se interessar pelo investimento na GDFV. Isto é, eleva-se a probabilidade de entrada dos SFV; o inverso dessa afirmativa também é verdadeiro.

### C. Modelagem da Variável de Saída do SIF

A saída do SIF é denominada de *Probabilidade de Instalação dos SFV* e deve expressar um índice referente ao grau de possibilidade de os consumidores adquirirem os SFV. Para definição desse índice, adotou-se como padrão o intervalo de avaliação [0, 1], ou seja, o índice estabelecido pelo controlador fuzzy estará definido nesse intervalo. Para fins práticos, este índice de saída está associado a níveis percentuais de penetração dos SFV.

A escolha dos valores percentuais foi realizada com base em percentuais de entrada dos SFV adotados em [23], nos percentuais estimados nos cenários de difusão dos SFV trabalhados por [24] e também na curva de adotantes percentuais das inovações apontada por [25] na Fig. 14. Esta curva mostra a distribuição de frequência normal dividida em cinco categorias de adoção: (1) inovadores, (2) adotantes precoces, (3) maioria precoce, (4) maioria tardia e (5) retardatários ou atrasados. Os dados são representados por uma curva cumulativa no formato de S.

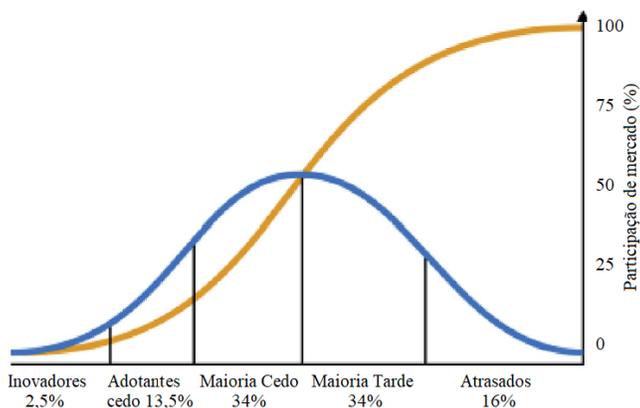


Fig. 14. Curvas de adoção da inovação.

Fonte: Adaptado de: [25].

Para a saída são atribuídos 5 subconjuntos *fuzzy*: **Improvável**, **Pouco provável**, **Provável**, **Bastante provável** e **Muitíssimo provável**. A TABELA VIII apresenta os tipos de funções utilizados e os parâmetros de cada subconjunto da saída.

Conjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
<b>Improvável</b>	<b>Triangular</b>	0,00	0,00	-	0,25
<b>Pouco provável</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,00	0,25	0,35	0,45
<b>Provável</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,35	0,45	0,55	0,65
<b>Bastante provável</b>	<b>Trapezoidal</b>	0,55	0,65	0,75	1,00
<b>Muitíssimo provável</b>	<b>Triangular</b>	0,75	1,00	-	1,00

Tabela VIII Funções e parâmetros dos subconjuntos fuzzy definidos para a saída do SIF.

Os parâmetros apresentados na TABELA VIII são necessários para estabelecer as fronteiras de atuação das funções de pertinência triangular e trapezoidal. Os subconjuntos que limitam o universo de avaliação, ou seja, os subconjuntos **Improvável** e **Muitíssimo provável** são mais específicos ao realizar a avaliação, ao serem descritos por funções triangulares. Isso significa que somente em uma situação muito específica, casos extremos, será atribuída a pertinência máxima. Estes casos ocorrem em 0 e 1 para o **Improvável** e **Muitíssimo provável**, respectivamente.

Já os subconjuntos intermediários **Pouco provável**, **Provável** e **Bastante provável** são representados por funções trapezoidais, fato que os torna mais relevantes na determinação da saída, uma vez que dão mais peso às regras para as quais foram atribuídos e também por cobrirem a maior parte da faixa de saída. Acredita-se que estas condições correspondem à maioria das regras. Cada subconjunto intermediário cobre uma terça parte do restante da saída total, garantindo uma avaliação mais equilibrada das condições de entrada. A Fig. 15 apresenta os respectivos subconjuntos fuzzy para a saída do SIF.

O SIF criado para avaliar o potencial de entrada dos SFV é baseado em 5 variáveis de entrada: Preço da Energia Elétrica (1), Custo do SFV (2), Políticas de Incentivos (3), Atratividade dos SFV (4) e o Tempo de Retorno do Investimento (5); e tem como saída a probabilidade de instalação do sistema. A saída tem dependência diretamente proporcional às entradas (3) e (4), e inversamente proporcional com as entradas (1), (2) e (5).

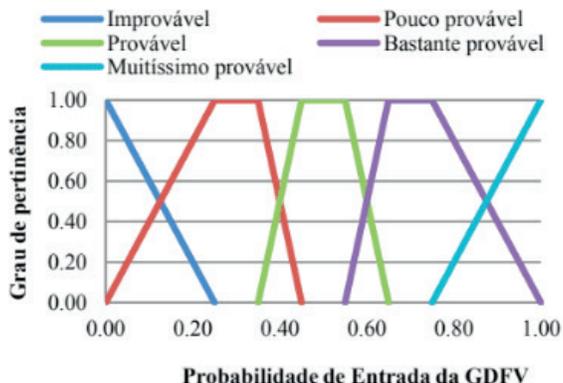


Fig. 15. Subconjuntos da Saída do SIF.

#### D. Saída do SIF - Defuzzificação

Para um sistema *fuzzy* cuja saída final precisa ser nítida, é necessário um passo para converter a conclusão difusa combinada final em uma definição nítida. Este passo é chamado de defuzzificação [3]. Esta também é conhecida como última etapa do processo que compõe a modelagem de um SIF, e corresponde na transformação dos valores fuzzy resultantes do processo de inferência em uma saída real (ou numérica). Em outras palavras, é o procedimento que permite interpretar a distribuição de possibilidades da saída de um modelo linguístico fuzzy de forma quantitativa, obtendo um único valor numérico que melhor represente esses valores fuzzy inferidos [5], [13].

Dentre as alternativas de métodos de defuzzificação possíveis, o selecionado foi o método do centro de gravidade ou centroide, que considera a união das conclusões de todas as regras ativas solucionando a integral de toda a área de saída [7], [12], [14].

#### E. Aplicação do SIF

Para exemplificar o desempenho do SIF, nas Fig. 16 e Fig. 17 são mostradas as saídas que correspondem à probabilidade de entrada da GDFV no SED. Na Fig. 16 adotou-se um cenário bastante limitador aos avanços na implantação da GDFV. Isto é, considerou-se que o preço da energia elétrica poderia reduzir-se em 25%, que o custo dos SFV se manteria estável, que as políticas de incentivos seriam deficitárias, que a atratividade dos SFV seria de baixa e que o tempo de retorno do investimento ficaria em 12 anos. Nessas condições verifica-se que a GDFV não deveria se desenvolver e ganhar espaços na distribuição, com probabilidade de entrada de apenas 8,14%.

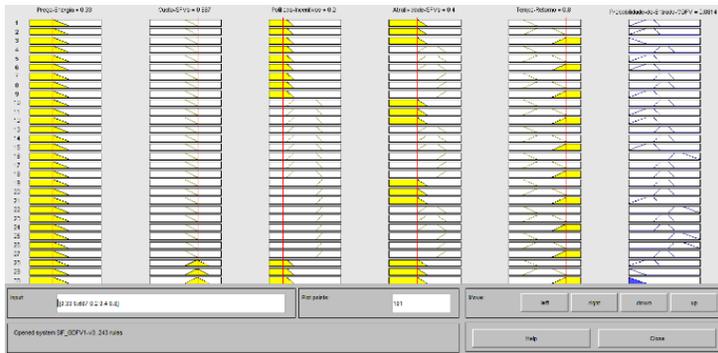


Fig. 16. Saída do SIF quando aplicadas condições desfavoráveis à GDFV.

Por outro lado, na Fig. 17 são consideradas condições muito favoráveis à penetração da GDFV. Foi adotado que preço da energia elétrica aumentaria em 30%, que preço dos SFV passaria por uma redução de 25%, que haveria várias políticas de incentivos para disseminação da GDFV, que a atratividade dos SFV seria boa e que o tempo de retorno do investimento seria baixo, 6 anos. Nesse cenário, observa-se que a GDFV teria grande potencial para se consolidar e ganhar participação na geração de eletricidade, com probabilidade de entrada de 84%.



Fig. 17. Saída do SIF quando aplicadas condições muitíssimo favoráveis à GDFV.

Os tipos de variáveis escolhidos são condizentes com os abordados em trabalhos que abordam problemas semelhantes a este. Acredita-se que o SIF desenvolvido foi capaz nortear a possibilidade de inserção da GDFV e pode ser estendido a outros trabalhos que tenham necessidades correlatas, sendo as variáveis de entrada calibradas de acordo com as características de cada caso.

## 9 | CONCLUSÕES

Neste artigo fizemos uma breve explanação sobre a lógica fuzzy e realizamos uma aplicação do procedimento de modelagem/cálculo utilizando o método. A maior contribuição deste artigo esteve na forma detalhada como o problema foi resolvido, bem como na revisão geral sobre a lógica difusa e suas aplicabilidades na modelagem e solução de problemas com grau de incerteza. Desenvolveu-se o passo-a-passo que, de forma simplificada, explica como aplicar a lógica dos sistemas nebulosos para modelar problemas e encontrar soluções, quando modelos determinísticos não aparentam ser uma alternativa viável.

Portanto, processos que requerem aprendizado ou raciocínio probabilístico por causa da incerteza e sistemas mal modelados por estarem associados à imprecisão ou descritos por modelos não-binários podem ser abordados pela lógica Fuzzy. Zadeh definiu lógica nebulosa como “computação com palavras”. Tal metodologia apresenta os seguintes recursos:

- São aplicáveis a sistemas não lineares;
- Possui capacidade de lidar com a não linearidade;
- Segue caminhos de raciocínio mais semelhantes aos humanos que os métodos clássicos;
- Utiliza autoaprendizado;
- Pode utilizar teoremas ainda a serem provados;
- É robusta na presença de ruído, erros e dados imperfeitos.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

[1] T. S. PERRY e L. A. Zadeh., “Fuzzy logic inventor biography,” *IEEE Spectrum*, vol. 32, p. p. 32–35, 1995.

[2] A. Barin, L. N. Canha e A. R. Abaide, “Methodology for Placement of Dispersed Generation Sources in Distribution Networks,” *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 10, n° 2, pp. 1544-1549, março 2012.

[3] E. D. W. Pei Zhai, “Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model,” *Renewable Energy*, n° 41, p. 350e357, 2012.

- [4] L. A. Zadeh, "Knowledge representation in Fuzzy logic," *IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING*, vol. 1, pp. 89-100, march 1989.
- [5] W. PEDRYCZ e F. GOMIDE, *Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing*, John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 544.
- [6] Mathworks., "Fuzzy Logic Toolbox," 2016.
- [7] M. A. Azzouz, H. E. Farag e E. F. El-Saadany, "Real-Time Fuzzy Voltage Regulation for Distribution Networks Incorporating High Penetration of Renewable Sources," *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, vol. 11, nº 3, pp. 1702-1711, setembro 2017.
- [8] F. A. Farret, M. G. Simões e D. I. Brandão, *Electronic Instrumentation for Distributed Generation and Power Processes*, Taylor & Francis Group, 2018.
- [9] J. S. R. JANG, "Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems.," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, p. 714–723, 1993.
- [10] L. N. Silva, "DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA INTELIGENTE PARA O DIAGNÓSTICO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA," Santa Maria, 2015.
- [11] J. F. M. Pessanha, "Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo – ANFIS," Rio de Janeiro, 2002.
- [12] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*, 3ª Edição ed., Novo México: John Wiley & Sons, 2010, p. 607.
- [13] N. k. Neto, "Sistema multivariável para avaliação de desempenho e estabelecimento de limites de continuidade de fornecimento de energia utilizando a lógica fuzzy," Santa Maria, 2012.
- [14] A. Soroudi, "Possibilistic-Scenario Model for DG Impact Assessment on Distribution Networks in an Uncertain Environment," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 27, nº 3, pp. 1283-1293, agosto 2012.
- [15] Y. Dote, "Introduction to Fuzzy Logic," *Proceedings of IECON 95 - 21st Annual*, pp. 50-56, 1995.
- [16] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica," 2018. [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. [Acesso em 17 novembro 2018].
- [17] A. Ferreira, S. S. Kunh, K. C. Fagnani, C. T. Tiago A. De Souza, G. R. D. Santos and C. H. Coimbra-Araújo, "Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 181-191, 2 março 2017.
- [18] H. F. Camilo, M. E. M. Udaeta, A. L. V. Gimenes e J. A. B. Grimoni, "Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 71, pp. 712-719, 2017.
- [19] A. R. O. d. Rosa e F. P. Gasparin, "PANORAMA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL," *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. VII, nº 2, pp. 140-147, dezembro 2016.

- [20] R. M. d. Silva, “ENERGIA SOLAR NO BRASIL: dos incentivos aos desafios,” Brasília, 2015.
- [21] BNDES, “BNDES muda regra e pessoas físicas podem investir em energia solar,” 2018. [Online]. Available: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-muda-regra-e-pessoas-fisicas-podem-investir-em-energia-solar>. [Acesso em 15 Junho 2018].
- [22] ANEEL, “PRODIST - Módulo 3,” 2018. [Online]. Available: <http://aneel.gov.br/modulo-3>. [Acesso em 10 novembro 2018].
- [23] J. B. Rosenkranz, C. B. Martinez-Anido e B. M. Hodge, “Analyzing the Impact of Solar Power on Multi-hourly Thermal Generator Ramping,” *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 153-158, 2016.
- [24] L. L. C. d. Santos, L. N. Canha e D. P. Bernardon, “Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers,” *Renewable Energy*, n° 116, pp. 384-401, 2018.
- [25] E. M. Rogers, “Diffusion of Innovations,” *Rev. Ed. Of Communication of Innovations*, n° 2, 1971.

## UM ESTUDO SOBRE A ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES FUZZY

Data de aceite: 01/07/2021

Data da submissão: 04/04/2021

### Géferson Rodrigo Sabino Silva

Instituto Federal do Tocantins – Campus  
Palmas  
Palmas – Tocantins  
<http://lattes.cnpq.br/9907461694249507>

### Wallysonn Alves de Souza

Instituto Federal do Tocantins – Campus  
Palmas  
Palmas - Tocantins  
<http://lattes.cnpq.br/9044733114581611>

**RESUMO:** Acontecimentos cotidianos são observados e nem todos os resultados e respostas são definidos em “sim” ou “não”, “ligado” ou “desligado”. Para as situações com variáveis incertas e dados imprecisos a lógica fuzzy, pelo método de Mamdani, é aplicada para que se conheça esses valores em resultados numéricos e se interprete as variações nas respostas e os comportamentos na dinâmica dos dados integrados ao sistema. Neste trabalho, o objeto de análise é o IMC (Índice de Massa Corporal) apresentando a aplicação do método do centroide na defuzzificação e manipulação dos valores de saída.

**PALAVRAS – CHAVE:** controladores fuzzy, fuzzy, lógica fuzzy, Mamdani.

### A STUDY ABOUT THE ANALYSIS AND DESIGN OF FUZZY CONTROLLERS

**ABSTRACT:** Daily events are observed and not all results and responses are defined as “yes” or “no”, “on” or “off”. For situations with uncertain variables and inaccurate data, the fuzzy logic, using the Mamdani’s method, is applied to know these values in numerical results and to interpret variations in responses and behaviors in the dynamics of the data integrated into the system. In this work, the object of analysis is the BMI (Body Mass Index) presenting the application of the centroid method in the defuzzification and manipulation of the output values.

**KEYWORDS:** fuzzy controllers, fuzzy, fuzzy logic, Mamdani.

## 1 | INTRODUÇÃO

Cotidianamente, ocorrem situações em que os resultados não são perfeitamente definíveis em dois estados, como “sim” ou “não”, “ligado” ou “desligado”, entre outras opções, como a intensidade da temperatura, tonalidade de cores etc. Para esses dados incertos e imprecisos, há dificuldade, ou até mesmo impossibilidade, na obtenção de todas as informações e equacionamentos dessa realidade do mundo, e tal condição, levou à proposição de lógicas alternativas que seriam mais propícias à representação do mundo particular em estudo.

Cientistas propuseram modelos de lógica e uma delas foi a lógica “fuzzy”, de

Zadeh, apresentada em 1965. Apresentou-se a lógica fuzzy como uma alternativa para a manipulação de dados imprecisos. Grande parte da problemática desse conhecimento sobre informações do pensamento, sensações ou percepções do mundo físico, está na representação matemática sem perder a precisão. A lógica fuzzy traz em sua teoria a possibilidade de expressar as enunciações do pensamento, isto é, as manifestações da linguagem natural, de forma matemática, sem diminuir a devida potência expressiva. Utilizando a lógica fuzzy conseguimos realizar operações com palavras, no qual, os conjuntos fuzzy realizam a função de expressar seus valores, de modo que a precisão ou imprecisão na saída será expressa por um número indicativo da possibilidade (e não da probabilidade), de que tal afirmação mostra-se correta, a depender do anseio do pesquisador (VAZ, 2006).

A linearização da planta em determinado ponto de operação de interesse é a técnica mais comum para se projetar um sistema de controle para plantas não-lineares. Geralmente, neste método, o modelo de projeto é um sistema linear invariante no tempo (SLIT) e na maioria dos casos o projeto dos controladores é relativamente simples. Porém, modelo de projeto como este descreve corretamente a dinâmica do sistema somente em uma certa vizinhança em torno do ponto de operação no qual houve a linearização do sistema. No entanto, este modelo de projeto torna-se, em geral, inadequado para os casos nos quais o sistema pode operar em regiões distantes do ponto de operação, o que leva a adotar um modelo de projeto mais sofisticado que permita considerar a dinâmica da planta em regiões distantes do ponto de operação mencionado de forma adicional (TEIXEIRA; PIETROBOM; ASSUNÇÃO, 2000).

A lógica fuzzy entende instruções linguísticas e gera estratégias de controle baseadas, em comunicação verbal, inicialmente (SAYERS; ANDERSON; BELL, 1998). Os conjuntos fuzzy são representados por meio de funções de pertinências, e pelo termo “variáveis linguísticas” é como tais instruções são conhecidas. As variáveis linguísticas têm por função o fornecimento de uma forma sistemática para as descrições aproximadas dos fenômenos complexos ou mal definidos utilizando um tipo de descrição linguística similar ao empregado pelos seres humanos (PINTO, 2010). As sentenças linguísticas, fundamentalmente, constituem-se no desempenho de um sistema de inferência fuzzy, a partir da obtenção das regras. Tomando o exemplo de um controlador fuzzy outra vez, o bom desempenho do sistema ocorre na definição da estratégia de controle por meio de regras consistentes (RAHMAN; MACHADO, 2006).

Com isso, este trabalho objetivou o estudo das principais técnicas de sistema de controle para sistemas não lineares, descritos por modelos fuzzy Mamdani. Este método possui a propriedade de aproximar funções contínuas via Sistema Baseado em Regras Fuzzy.

## 21 METODOLOGIA

A arquitetura de um Sistema Baseado em Regras Fuzzy é composta de três módulos interconectados, conforme a Figura 1. Na indicação da figura, o módulo de Fuzzificação transforma dados de entrada em fuzzy. Sequencialmente, o módulo de Inferência é organizado para traduzir o conhecimento do fenômeno/sistema armazenado em uma base de regras fuzzy em uma função matemática. E, se um conjunto fuzzy for a saída produzida pelo módulo de Inferência, o módulo de Defuzzificação realiza a conversão da saída fuzzy para valor de saída adequado (WATANABE, 2016).

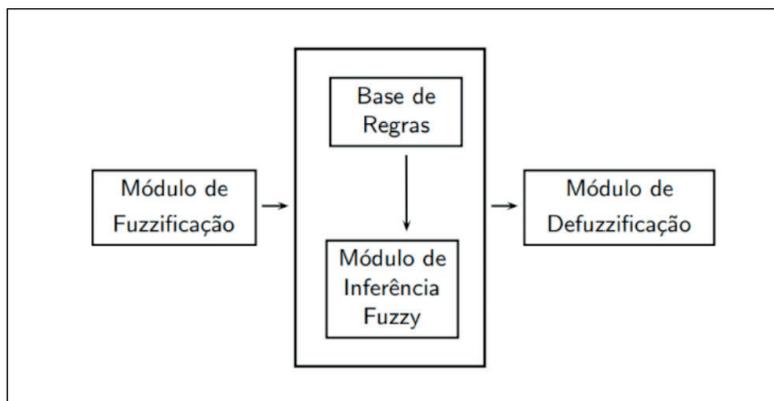


Figura 1 – Arquitetura do sistema baseado em regras fuzzy

Fonte: BARROS; BASSANEZI, 2006.

A descrição acima permite conhecer o estudo, objeto desta pesquisa, que foi focado em casos reais com a determinação das premissas, modelagem do método, fuzzificação das variáveis de entrada, funções de pertinência, inferência e defuzzificação. Com o suporte do livro “Controle e Modelagem Fuzzy”, de Marcelo Godoy Simões e Ian S. Shaw (2007), e o manuseio do *software* MATLAB o trabalho seguiu para simulações. O material escolhido para o experimento foi o cálculo de IMC (Índice de Massa Corporal), de Tiago Kohagura (2007), cujo intuito foi de analisar as entradas do sistema e as regras (combinações/ condições), como mostrados nas figuras a seguir.

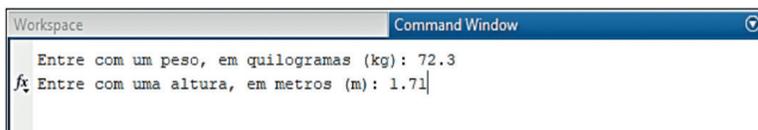


Figura 2 - Informações de entrada (peso e altura)

Fonte: Autor, 2020.

```

1 - clear all; clc;
2 - peso = input ('Entre com um peso, em quilogramas (kg): ');
3 - altura = input ('Entre com uma altura, em metros (m): ');
4
5 - %**** PARTE 1 - Definição dos conjuntos fuzzy ****
6 - SistFuzzy= newfis('FuzzyIMC');
7 - %Input 1 = Peso
8 - SistFuzzy= addvar(SistFuzzy,'input','Peso',[0 120]);
9 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',1,'Leve','trimf',[40 50 60]);
10 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',1,'Medio','trimf',[50 70 80]);
11 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',1,'Pesado','trimf',[70 90 110]);
12 - %Input 2 = Altura
13 - SistFuzzy= addvar(SistFuzzy,'input','Altura',[0 2.1]);
14 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',2,'Baixo','trimf',[1.4 1.5 1.7]);
15 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',2,'Mediano','trimf',[1.6 1.7 1.9]);
16 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'input',2,'Alto','trimf',[1.8 1.9 2]);
17 - %Output = IMC
18 - SistFuzzy= addvar(SistFuzzy,'output','IMC',[-30 30]);
19 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'output',1,'Muito Gordo','trimf',[-25 -20 -10]);
20 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'output',1,'Gordo','trimf',[-20 -15 0]);
21 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'output',1,'Normal','trimf',[-5 0 5]);
22 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'output',1,'Magro','trimf',[0 10 15]);
23 - SistFuzzy= addmf(SistFuzzy,'output',1,'Muito Magro','trimf',[10 15 25]);
24 - figure(1)
25 - subplot(3,1,1),plotmf(SistFuzzy,'input',1);
26 - subplot(3,1,2),plotmf(SistFuzzy,'input',2);
27 - subplot(3,1,3),plotmf(SistFuzzy,'output',1);

```

Figura 3 - Sistemas de regras (combinações/condições)

Fonte: Autor, 2020.

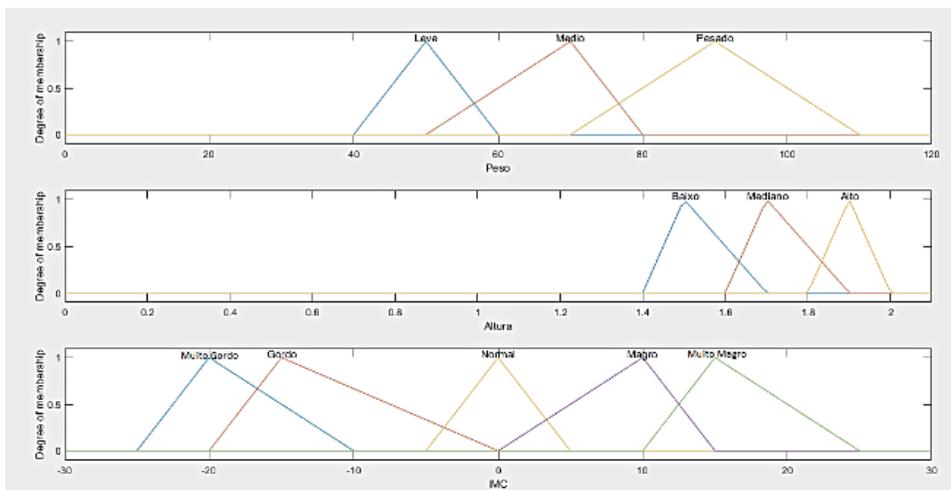


Figura 4 - Exibições das funções de inferências fuzzy

Fonte: Autor, 2020.

O método de defuzzificação utilizado para a obtenção dos resultados foi o Centroide ou Centro de Massa (Figura 5), em que, numericamente, o valor obtido representa o centro de gravidade da distribuição de possibilidade de saída do sistema fuzzy, podendo ser desenvolvido da seguinte maneira:

- i) determinar a abscissa do ponto centroide para cada saída ativada na inferência;
- ii) calcular a área entre o grau de pertinência e o eixo x para cada saída ativada;
- iii) calcular a média ponderada dos pontos centroides pelas respectivas áreas.

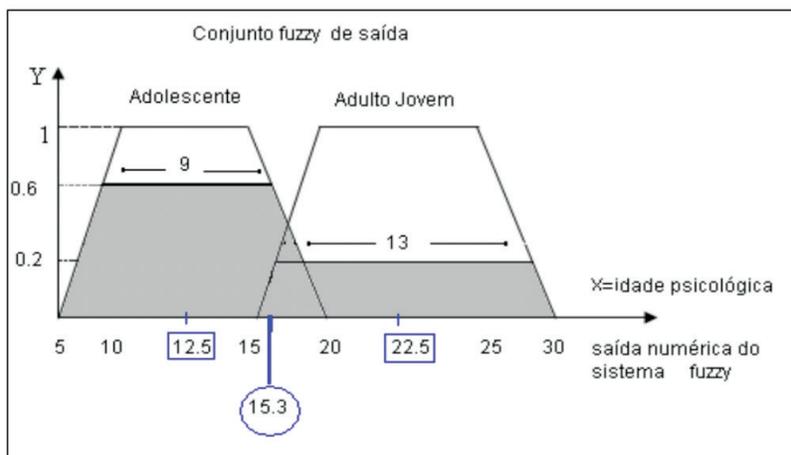


Figura 5 - Defuzzificação utilizando o método do centro de massa

Fonte: Silvia Nassar (Disponível em: <https://bit.ly/2ILQDUx>).

Exemplificando o cálculo do centro de massa, a Figura 6 mostra a obtenção do valor numérico, reforçando a definição apresentada anteriormente.

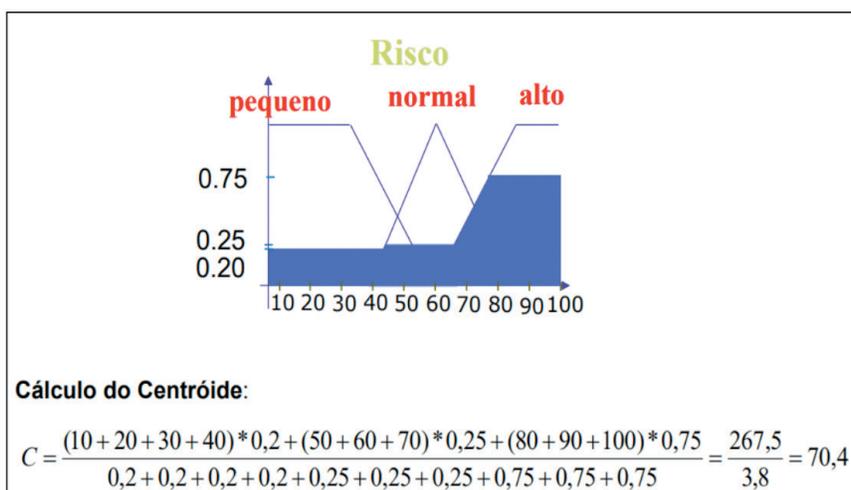


Figura 6 - Cálculo do centro de massa

Fonte: Joseana Araújo (Disponível em: <https://bit.ly/3fBFVP7>).

Da simulação computacional, analisou-se o código dessas funções fuzzy e propôs-se modificá-las para que uma nova interação com o usuário ocorresse, não mais operando com valores numéricos nas funções de inferência - padrão das saídas fuzzy -, mas exibindo um resultado em texto que facilitasse a leitura do usuário (Figura 7).

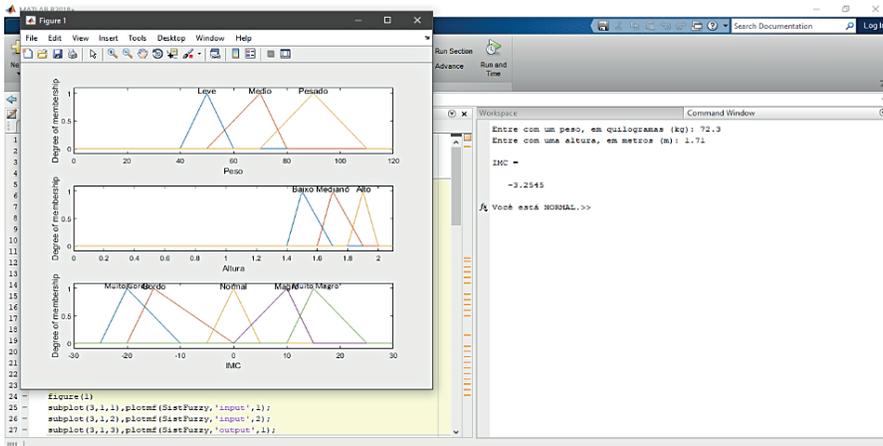


Figura 7 - Informações de saída do IMC

Fonte: Autor, 2020.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação da lógica fuzzy é apresentada como uma metodologia adequada no tratamento de dados, principalmente, quando estes são imprecisos, como é recorrente nos casos de gestores de negócios quanto às informações correspondentes aos seus empreendimentos. Dessa forma, a lógica fuzzy apresenta vantagens em seus fundamentos e propriedades, como o alcance de resultados rápidos e aproximados, e o tratamento de incertezas características (VITALINO; LEITE, 2012).

Os controladores fuzzy comandam as tarefas por meio de termos de linguagem usual. Desta forma, é verificado que variáveis linguísticas desempenham papel fundamental neste processo. Os termos que são traduzidos por conjuntos fuzzy, são utilizados para transcrever a base de conhecimentos através de uma coleção de regras fuzzy, denominada base de regras fuzzy (CORCOLL-SPINA, 2010). A partir desta base de regras obtém-se a relação fuzzy, a qual produzirá a saída para cada entrada por meio das funções de inferência (Figura 4).

Uma propriedade deste procedimento de implementação computacional do método de Mamdani é que os resultados são retornados em valores numéricos que podem ser verificados nas funções de inferência (Figura 6), mediante a aplicação matemática do método de defuzzificação escolhido, centroide/centro de massa. Neste caso, do IMC, retorna-se, finalmente, ao indivíduo sua classificação em “Muito Gordo”, “Gordo”, “Normal”, “Magro” e “Muito Magro”, como uma tradução do valor numérico retornado.

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem de controladores fuzzy tem importantes aplicações, pois se organiza para tratar de trabalhos com elementos de incertezas, como ponderação de variáveis ambientais, climáticas, análise imobiliária, valoração de empresas, projeção de negócios e investimentos financeiros etc. A lógica fuzzy e suas aplicações conduziram diversos e inúmeros estudos, tornando conhecida a possibilidade de fornecerem uma alternativa promissora para modelagem de determinadas situações complexas, seja pelas técnicas matemáticas ou pelo sistema a ser modelado (VAZ, 2006).

O estudo desenvolveu-se em um sistema de baixa complexidade, a fim de simplificar a compreensão do problema, das variáveis, a análise matemática, a implementação computacional e a interpretação dos resultados, com base no método de tradução da expressão matemática, a defuzzificação. Considerando o resultado deste trabalho positivo, propõe-se ainda, um estudo mais aprofundado sobre a modelagem de controladores fuzzy, no intuito de elevar a complexidade do sistema e aplicá-los nos diversos sistemas não lineares e variantes no tempo, como processos do setor administrativo, agronegócio, indústria, mercado financeiro etc., que são os sistemas reais.

## REFERÊNCIAS

BARROS, L.; BASSANEZI, R. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. 2. ed. Campinas: IMECC, 2006.

CORCOLL-SPINA, Catharina de Oliveira. **Lógica Fuzzy: reflexões que contribuem para a questão da subjetividade na construção do conhecimento matemático**. 2010. 165 p. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/48134/tde-21012011-104236/pt-br.php>. Acesso em: 30 mar. 2020.

KOHAGURA, Tiago. **Lógica fuzzy e suas aplicações**. 2007. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

PINTO, Raphael Lemos. **Aplicação de um Sistema Especialista Fuzzy para Redução de Manobras de Dispositivos Shunts Chaveados Automaticamente por um Compensador Estático**. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/RaphaelLemosPinto.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/RaphaelLemosPinto.pdf). Acesso em: 30 set. 2020.

RAHMAN, José Mounir Bezerra; MACHADO, Maria Augusta Soares. Os registradores de dados de voo e a lógica difusa: O uso de uma nova ferramenta. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2006. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/anais/2006>. Acesso em: 18 out. 2020.

SAYERS, T.; ANDERSON, J.; BELL, M, (1998). **Traffic Control System Optimizations: A Multiobjective Approach**. 3rd IMA International Conference on Mathematics in Transport Planning and Control. Cardiff.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007. 200 p.

TEIXEIRA, Marcelo Carvalho Minhoto; PIETROBOM, Hilton Cleber; ASSUNÇÃO, Edvaldo. Novos resultados sobre a estabilidade e controle de sistemas não-lineares utilizando modelos fuzzy e LMI. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 11, n. 01, p. 37-48, Jan./Fev./Mar./Abr. 2000. Disponível em: <https://www.sba.org.br/revista/vol11/v11a245.pdf>. Acesso em 12 dez. 2020.

VAZ, Alessandro Márcio. **Estudo das funções de pertinência para conjuntos fuzzy utilizados em Controladores Semafóricos Fuzzy**. 2006. 158 p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/6379>. Acesso em: 21 nov. 2020.

VITALINO, Rafael Chagas; LEITE, Ricardo Ávila Guterres Pinheiro. **Modelo Fuzzy para Valoração de Pequenas Empresas**. 2010. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://monografias.poli.ufrj.br/monografiadownload.php?farquivo=monopoli10004890.pdf&fcodigo=703>. Acesso em: 20 mai. 2020.

WATANABE, Ricardo Augusto. **Um estudo sobre um método de defuzzificação para eventos fuzzy em sistemas baseados em regras**. 2016. 84 p. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) - Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/307050>. Acesso em: 14 out. 2020.

# CAPÍTULO 4

## FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – UM ESTUDO DE CASO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Data de aceite: 01/07/2021

Data da submissão: 03/06/2021

### Hugo Andrés Ruiz Flórez

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

### Diogo Marujo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná -  
UTFPR  
Medianeira – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0507143597634871>

### Gloria Patricia Lopez Sepulveda

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

### Alexander Molina Cabrera

Universidad Tecnológica de Pereira - UTP  
Pereira – Colômbia  
<https://orcid.org/0000-0003-2448-2174>

**RESUMO:** As análises de fluxo de carga podem ser executadas através da implementação computacional do método de Newton-Raphson usando uma linguagem de programação específica ou por meio de softwares comerciais ou gratuitos desenvolvidos exclusivamente para realizar estudos em Sistemas Elétricos de Potência. Contudo, existe uma importante alternativa de solução que tem sido raramente

explorada e consiste em representar o problema de fluxo de carga como sendo um modelo de otimização matemática. Esta alternativa de solução não só permite resolver o problema de fluxo de carga através de um software de modelagem algébrica, como também, facilita a resolução de outros problemas de maior complexidade matemática com certa facilidade ao realizar adaptações no modelo matemático. Assim sendo, neste trabalho será usada a linguagem AMPL junto com o solver Knitro para resolver o problema de fluxo de carga em Sistemas de Potência. Para isto, será considerado um estudo de caso que consiste na determinação do ponto de operação de um sistema-teste. Nos resultados são apresentados detalhadamente os principais aspectos que devem ser considerados para poder usar a linguagem AMPL como solução do problema de fluxo de carga. Os resultados obtidos indicam primeiramente que, podem ser realizados estudos de fluxo de carga ao representar o problema mediante o uso de modelagem matemática e, em segundo lugar, que é possível solucionar satisfatoriamente o problema usando um dos principais softwares de otimização matemática, como é o caso do AMPL. **PALAVRAS - CHAVE:** Fluxo de Carga, Sistemas Elétricos de Potência, Otimização Matemática, AMPL, Solver Knitro.

### ELECTRICAL POWER SYSTEM LOAD FLOW – A CASE STUDY USING THE AMPL LANGUAGE

**ABSTRACT:** Load flow studies can be executed by the computational implementation of the

Newton-Raphson method developed for a specific programming language or by commercial and free software developed to perform electrical power system analysis. Nevertheless, there is an alternative solution that solves the load flow problem as a mathematical optimization problem. This alternative approach allows to solve the load flow problem using a mathematical optimization software, and enables the solution of other more complex mathematical problems with relative ease by modifying the mathematical model. Thereby, we use the AMPL language and Knitro solver to model and solve the Power System Load Flow problem. Thus, a case study that consists in determining the operating point of a test-system is considered. The main factors that must be considered for using the AMPL language as a solution to the load flow problem are presented in detail. The results obtained highlight that the load flow analysis can be performed using mathematical modeling, and, it is possible to successfully solve the load flow problem using one of the main mathematical optimization software, such as, the AMPL language.

**KEYWORDS:** Load flow, Eletrical Power Systems, Mathematical Optimization, AMPL Language, Knitor Solver.

## 1 | INTRODUCCIÓN

O cálculo do ponto de operação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) em regime permanente é uma tarefa fundamental que deve ser realizada pelos centros de controle de energia dos SEP com o intuito de verificar que o mesmo opere dentro dos limites operativos estabelecidos. Assim, uma vez conhecida a topologia do SEP, seus componentes e para uma condição operativa específica, o ponto de operação pode ser estimado mediante o cálculo das variáveis de estado (módulos e os ângulos das tensões nas barras).

Tradicionalmente, o problema de fluxo de carga tem sido resolvido através do método Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983). Este método caracteriza-se por calcular de maneira satisfatória o ponto de operação de um SEP usando um procedimento iterativo para resolver um conjunto de equações não-lineares.

De forma geral, existem duas alternativas para resolver o problema de fluxo de carga em SEP. A primeira delas consiste na implementação computacional do método de Newton-Raphson usando uma linguagem de programação específica (Matlab, C++, Python, entre outras). E a segunda alternativa consiste em fazer uso de softwares privativos ou gratuitos, tais como, ANAREDE, PowerWorld, MATPOWER, DigSilent, PSAT, entre outros (TAMASHIRO, 2016). No entanto, existe uma alternativa de solução que consiste em representar o problema de fluxo de carga como sendo um modelo de otimização matemática. A principal vantagem desta alternativa de solução consiste em, além de resolver o problema de fluxo de carga, poder realizar com certa facilidade algumas adaptações no modelo matemático, de tal forma que, seja possível resolver outros problemas da área dos SEP. Além disso, esses modelos de otimização matemática podem ser resolvidos por softwares de modelagem algébrica amplamente usados em SEP (GAMS, Lingo, Pyomo, AMPL, entre outros).

Neste trabalho, será usada a linguagem AMPL junto com o solver Knitro para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP. Para essa finalidade, será considerado um modelo matemático adaptado das análises de fluxo de carga ótimo (MADANI, 2015) e será realizado um estudo de caso que compreende a determinação do ponto de operação de um sistema-teste disponível em Glover (2011). Os resultados obtidos através do AMPL são comparados com os resultados entregues pelo software PowerWorld.

Em síntese, os resultados obtidos mostram que a linguagem AMPL pode ser usada para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

## 2 | LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO AMPL

AMPL é uma linguagem de modelagem algébrica de alto nível usada para solucionar problemas complexos de programação matemática e de grande escala (FAVERO, 2013). Esta importante ferramenta matemática foi desenvolvida por Fourier et al. (1985) e surgiu como uma necessidade computacional de expressar de uma forma mais simples os modelos de otimização matemática, de modo que, estes possam ser interpretados pela maioria dos softwares matemáticos, conhecidos como *solvers*. Basicamente, o AMPL é uma interface simples que facilita a comunicação entre o usuário e o solver (FAVERO, 2013).

Uma das grandes vantagens da linguagem AMPL consiste em expressar de uma forma simples os modelos de otimização matemática através de uma sintaxe computacional bem próxima à usada na linguagem matemática (OLSZAK, 2018). Consequentemente, esta condição permite que os modeladores possam investir mais o tempo melhorando os modelos matemáticos do que lidando com a sua sintaxe e solução (HOLMES, 1992).

Atualmente, existem várias versões disponíveis do AMPL que podem ser executadas em diferentes plataformas como Windows, Linus e macOS. A primeira delas é a versão demo que se encontra disponível junto com alguns solvers (Knitro, CPLEX, entre outros) de forma gratuita no site <https://ampl.com/> e permite resolver problemas com até 300 variáveis e 300 restrições para problemas de Programação Linear e 500 variáveis e 500 restrições para problemas de Programação Não Linear. Por sua vez, a versão privativa não possui limites de variáveis nem restrições e disponibiliza uma maior quantidade de solvers.

Certamente, estas características justificam os motivos pelos quais o AMPL vem sendo usado recentemente na resolução de diversos problemas na Engenharia. Nesse contexto, a seguir serão apresentados os principais aspectos que devem ser seguidos para poder resolver um problema de otimização matemática usando a ferramenta AMPL.

### 2.1 Resolução de modelos matemático no AMPL

Existem diferentes formas que podem ser usadas para obter a solução de um modelo matemático usando o AMPL. Uma das mais usadas consiste em criar três arquivos de texto com extensões **.mod**, **.dat** e **.run**, os quais contêm a definição do modelo matemático, os dados de entrada e o arquivo principal com os comandos a serem executados,

respectivamente. Entretanto, é possível usar os arquivos **.dat** e **.run** para resolver os modelos matemáticos. No caso deste último arquivo, pode ser usado como referência o layout mostrado na Figura 1.

```
reset;
model;
# *****
# Declaração dos Conjuntos (set nome_conjunto;)

# *****
# Declaração dos Parâmetros (param nome_parâmetro;)

# *****
# Dados de Entrada (data nome_arquivo;)

# *****
# Declaração das Variáveis (var nome_variável;)

# *****
# Definição da Função objetivo (minimize nome_função:)

# *****
# Definição das Restrições (subject to nome_restrição:)

# *****
# Solução do modelo matemático (option solver nome_solver;)

# *****
# Saída dos resultados
```

Figura 1 – Layout do arquivo **.run** usado como referência

Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 1, destaca-se que os comandos **reset** e **model** são usados para apagar da memória as informações de modelos anteriores e para ativar o modo modelo, respectivamente. Além disso, por simplicidade, o modelo matemático pode ser dividido em várias etapas e definido de forma sequencial.

Nas próximas seções será mostrado em detalhe como pode ser modificado o layout anterior, de tal forma que, seja possível representado o modelo matemático do problema de fluxo de carga.

### 3 | MÉTODO DE NEWTON RAPHSON

De uma forma geral, o método de Newton-Raphson determina os valores das tensões complexas ( $V$ ,  $\theta$ ) que satisfazem as equações de balanço de potências nas barras

do SEP:

$$P_i^G - P_i^D - P_i(V, \theta) = 0 \quad (1)$$

$$Q_i^G - Q_i^D - Q_i(V, \theta) = 0 \quad (2)$$

Sendo que  $P_i^G$ ,  $Q_i^G$  são as potências ativas e reativas geradas;  $P_i^D$ ,  $Q_i^D$  são as demandas de potência ativa e reativa;  $P_i(V, \theta)$ ,  $Q_i(V, \theta)$  são as injeções de potência ativa e reativa na barra  $i$ .

De acordo com o anterior, o método de Newton-Raphson permite estimar os valores das tensões complexas ( $V$ ,  $\theta$ ), a partir dos dados das potências ativas e reativas (geração e demanda) das diferentes barras provenientes de um ponto de operação específico do SEP. Logo, o sistema de equações apresentado em (1) e (2) é solucionado de forma aproximada, de tal forma que através de um processo iterativo na iteração  $k$  tem-se:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^G - P_i^D - P_i^{(k)}(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \approx 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^G - Q_i^D - Q_i^{(k)}(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \approx 0 \quad (4)$$

Destacando que o número de equações necessário para resolver o sistema de equações anterior dependerá do tipo de barra do SEP: Barra de referência ( $V$ ,  $\theta$ ), barra de tensão controlada ( $PV$ ) e barra de carga ( $PQ$ ). Conseqüentemente, para determinar os valores das tensões do SEP deve ser usada a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \theta^{(k+1)} \\ V^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ V^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(k)} \\ \Delta V^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ V^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H(V^{(k)}, \theta^{(k)}) & N(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \\ M(V^{(k)}, \theta^{(k)}) & L(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde  $H$ ,  $N$ ,  $M$  e  $L$  pertencem a matriz Jacobiana do sistema. Por último, o processo iterativo continua até satisfazer a convergência.

#### 4 | MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA

Com base nos modelos matemáticos usados para solucionar o problema de Fluxo de Potencia Ótimo apresentados em MADANI, (2015) e o equacionamento do método de Newton-Raphson é possível usar o seguinte modelo de otimização não-linear para solucionar o problema de fluxo de carga:

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in \Omega L} g_{ij} (t_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2t_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (6)$$

s. a.

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{(i,j) \in \Omega L} P_{ij} = 0, \quad \forall i \in \Omega B \quad (7)$$

$$Q_i^G - Q_i^D + Q_i^{sh} - \sum_{(i,j) \in \Omega L} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega B \quad (8)$$

$$\underline{Q}_i^G \leq Q_i^G \leq \overline{Q}_i^G \quad \forall i \in \Omega B \quad (9)$$

Sendo que:

- A função objetivo mostrada em (6) representa as perdas de potência ativa do SEP.
- As restrições (7) e (8) representam o balanço de potência ativa e reativa, onde os fluxos de potência ativa e reativa são calculados da seguinte forma:

$$P_{ij} = (t_{ij}V_i)^2 g_{ij} - t_{ij}V_iV_j (g_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + b_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (10)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2(t_{ij}^2 b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij}V_iV_j (b_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - g_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (11)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - t_{ij}V_iV_j (g_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - b_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (12)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2(b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij}V_iV_j (b_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + g_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (13)$$

- A restrição (9) corresponde os limites de geração de potencia reativa nas barras do SEP.

Importante salientar que na função objetivo do modelo matemático proposto pode ser usada a equação (14), que corresponde às perdas de potência reativa, sem que isto afete os resultados finais.

$$Q_L = - \sum_{(i,j) \in \Omega_L} b_{ij} (t_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2t_{ij}V_iV_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (14)$$

Em síntese, embora o modelo matemático anterior seja usado para realizar estudos convencionais de fluxo de carga, o mesmo poderá sofrer alterações em função das especificidades dos estudos a serem realizados.

## 5 | ESTUDO DE CASO PROPOSTO

O procedimento que deve ser realizado para determinar o ponto de operação de um SEP através da linguagem AMPL será explicado através do sistema-teste disponível em (GLOVER, 2011), cujos resultados da análise de fluxo de carga obtidos com o software PowerWorld são apresentados na Figura 1.

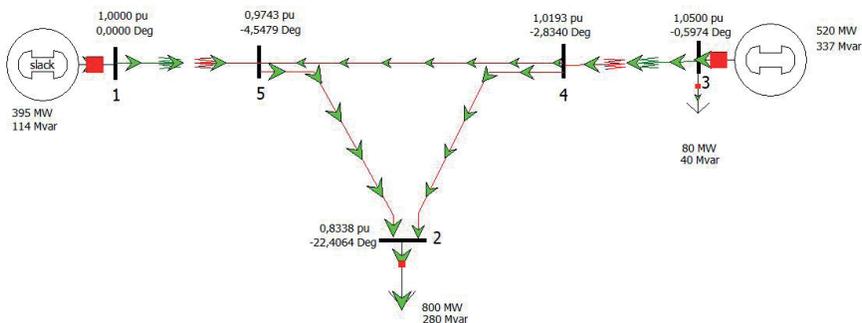


Figura 1 – Resultados do fluxo de carga usando o software PowerWorld

Fonte: Autoria própria

Os dados de entrada do sistema-teste necessários para realizar uma análise convencional de fluxo de carga são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

$i$	Tipo	$P_i^{Gesp}$	$Q_i^{Gesp}$	$P_i^{Desp}$	$Q_i^{Desp}$	$V_i^{esp}$	$\theta_i^{esp}$	$Q_i^{Gmin}$	$Q_i^{Gmax}$	$B_i^{sh}$
1	$V\theta$	--	--	0,00	0,00	1,00	0,00	--	--	0,00
2	$PQ$	0,00	0,00	8,00	2,80	--	--	--	--	0,00
3	$PV$	5,20	--	0,80	0,40	1,05	--	-2,80	4,00	0,00
4	$PQ$	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	--	--	0,00
5	$PQ$	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	--	--	0,00

Tabela 1 – Dados de entrada referente às barras do sistema-teste

Fonte: Modificado de Glover, 2011

$i$	$j$	$r_{ij}$	$x_{ij}$	$b_{ij}$	$t_{ij}$
1	5	0,00150	0,0200	0,0000	1,0000
3	4	0,00075	0,0100	0,0000	1,0000
2	4	0,00900	0,1000	1,7200	1,0000
2	5	1,00450	0,0500	0,8800	1,0000
4	5	0,00225	0,0250	0,4400	1,0000

Tabela 2 – Dados de entrada referente às LT e transformadores do sistema-teste

Fonte: Modificado de Glover, 2011

Com base nos dados anteriores e considerando o equacionamento do modelo de otimização matemática do problema de fluxo de carga apresentado na Seção 4, são descritos a seguir os principais aspectos para obter a solução do problema usando a linguagem de programação matemática AMPL.

## 5.2 Dados de entrada

As informações do sistema-teste apresentadas nas Tabelas 1 e 2 podem ser inseridas em um arquivo de texto como mostrado na Figura 2.

```

param:  OB: TB  PG_esp  QG_esp  PD_esp  QD_esp  V_esp          Th_esp  Qmin  Qmax  Bsh:=
        1  1  0        0        0        0        1          0      -999  999   0
        2  0  0        0        8        2.8      1          0        0    0     0
        3  2  5.2      0        0.8      0.4      1.05       0      -2.8  4.0   0
        4  0  0        0        0        0        1          0        0    0     0
        5  0  0        0        0        0        1          0        0    0     0
;

param:  OL: r          x          b          t:=
        1  5  0.00150      0.0200      0.0000      1.0000
        3  4  0.00075      0.0100      0.0000      1.0000
        2  4  0.00900      0.1000      1.7200      1.0000
        2  5  0.00450      0.0500      0.8800      1.0000
        4  5  0.00225      0.0250      0.4400      1.0000
;

```

Figura 2 – Dados entrada do sistema-teste

Fonte: Autoria própria

Cabe salientar que, os dados numéricos que não foram especificados na Tabela 1 correspondem às incógnitas do problema de fluxo de carga (exceto os valores de  $Q_i^{Gmin}$  e  $Q_i^{Gmax}$  do barramento  $V\theta$ ). Portanto, estes valores podem ser definidos conforme apresentados anteriormente na Figura 2.

### 5.3 Definição de conjuntos e parâmetros

Pode-se apreciar na base de dados do sistema-teste que alguns parâmetros fazem referência aos barramentos do sistema-teste, enquanto que, outros parâmetros fazem referência às linhas de transmissão. Por tal motivo, faz-se necessário definir os conjuntos e parâmetros mostrados na Figura 3.

Adicionalmente, de acordo com a formulação do modelo matemático proposto, faz-se necessário definir e calcular os valores das condutâncias e as susceptâncias das LT. Esse procedimento pode ser realizado depois de importar os dados da base de dados conforme é mostrado na Figura 4.

```

# *****
# Declaração dos Conjuntos (set nome_conjunto;)
# *****
set OB;                #Conjunto de Barras do sistema
set OL within {OB,OB}; #Conjunto de linhas do sistema
# *****
# Declaração dos Parâmetros (param nome_parâmetro;)
# *****
# Parâmetros das barras com valores definidos na base de dados
param TB{OB};          #Tipo de barra (1 slack; 0 PQ; 2 PV)
param PG_esp{OB};      #Potência ativa gerada especificada
param QG_esp{OB};      #Potência reativa gerada especificada
param PD_esp{OB};      #Potência ativa demanda especificada
param QD_esp{OB};      #Potência reativa demandada especificada
param V_esp{OB};       #Módulo da tensão especificada
param Th_esp{OB};      #Ângulo da tensão especificada
param Qmin{OB};        #Valor mínimo da potência reativa gerada
param Qmax{OB};        #Valor máximo da potência reativa gerada
param Bsh{OB};         #Susceptância shunt

# Parâmetros das linhas com valores definidos na base de dados
param r{OL};           #Resistência da LT
param x{OL};           #Reatância da LT
param bsh{OL};         #Susceptância da LT
param t{OL};           #Tap do transformador

```

Figura 3 – Declaração de conjuntos e parâmetros no AMPL

Fonte: Autoria própria

```

# *****
# Dados de Entrada (data nome_arquivo;)
# *****

data STEE5b.dat;

# *****
# Cálculo da conductância g e susceptância das LT
# *****

# Parâmetros condutância e susceptância das linhas
param g{OL};
param b{OL};

let {(i,j) in OL} g[i,j]:= r[i,j]/(r[i,j]^2 + x[i,j]^2);
let {(i,j) in OL} b[i,j]:= -x[i,j]/(r[i,j]^2 + x[i,j]^2);

```

Figura 4 – Cálculo das condutâncias e susceptâncias das LT

Fonte: Autoria própria

## 5.4 Definição das variáveis

De uma forma geral, as incógnitas do problema do modelo matemático proposto podem ser definidas como mostrado na Figura 5:

```
# *****  
# Declaração das Variáveis (var nome_variável);  
# *****  
  
# Variáveis das barras  
var V{OB}; # Módulo das tensões nodais  
var Th{OB}; # Ângulo das tensões nodais  
var PG{OB}; # Potência ativa gerada  
var QG{OB}; # Potência reativa gerada  
var PD{OB}; # Potência ativa demandada  
var QD{OB}; # Potência reativa demandada  
  
# Variáveis das linhas  
var PL{OB,OB}; # Fluxo de potência ativa  
var QL{OB,OB}; # Fluxo de potência reativa
```

Figura 5 – Declaração das variáveis do problema

Fonte: Autoria própria

No entanto, cabe destacar que algumas destas variáveis são conhecidas em função do tipo de barramento. Portanto, na Figura 6 mostra-se como podem ser atribuídos os valores às variáveis cujos valores foram especificados inicialmente na base de dados do problema.

```
# *****  
# Variáveis com valores conhecidos  
# *****  
  
# Na barra de referência  
fix {i in OB : TB[i]==1} V[i]:= V_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} Th[i]:= Th_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} QD[i]:= QD_esp[i];  
  
# Nas barras de tensão controlada  
fix {i in OB : TB[i]==2} V[i]:= V_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} PG[i]:= PG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} QD[i]:= QD_esp[i];  
  
# Nas barras de carga  
fix {i in OB : TB[i]==0} PG[i]:= PG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} QG[i]:= QG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} QD[i]:= QD_esp[i];
```

Figura 6 – Variáveis do problema com valores especificados

Fonte: Autoria própria

## 5.5 Inicialização das variáveis de decisão

As tensões nodais podem ser inicializadas a partir dos dados de entrada como ilustrado na Figura 7.

```
# *****  
# Inicialização dos módulos e ângulos das tensões  
# *****  
  
let {i in OB} V[i]:= V_esp[i];  
let {i in OB} Th[i]:= Th_esp[i];
```

Figura 7 – Variáveis do problema com valores especificados

Fonte: Autoria própria

## 5.6 Definição do modelo matemático

O modelo matemático de otimização do problema de fluxo de carga proposto pode ser expresso através da função objetivo e as restrições apresentadas na Figura 8.

```
# *****  
# Definição da Função objetivo (minimize nome_função:)  
# *****  
  
minimize Perdas: sum{(i,j) in OL} g[i,j]*(t[i,j]^2*v[i]^2+v[j]^2-  
2*t[i,j]*v[i]*v[j]*cos(Th[i]-Th[j]));  
  
# *****  
# Definição das Restrições (subject to nome_restricção)  
# *****  
  
subject to r1{i in OB}: PG[i]-PD[i]-sum{(i,j) in OL} PL[i,j]-  
sum{(j,i) in OL} PL[i,j]=0;  
  
subject to r2{i in OB}: QG[i]-QD[i]+Bsh[i]*V[i]^2-  
sum{(i,j) in OL} QL[i,j]-sum{(j,i) in OL} QL[i,j] = 0;  
  
subject to r3{(i,j) in OL}: PL[i,j]=(t[i,j]*v[i])^2*g[i,j]-t[i,j]*v[i]*v[j]*  
(g[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])+b[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r4{(i,j) in OL}: QL[i,j]=-v[i]^2*(t[i,j]^2*b[i,j]+bsh[i,j])+t[i,j]*v[i]*v[j]*  
(b[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])-g[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r5{(i,j) in OL}: PL[j,i]=v[j]^2*g[i,j]-t[i,j]*v[j]*v[i]*  
(g[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])-b[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r6{(i,j) in OL}: QL[j,i]=-v[j]^2*(b[i,j]+bsh[i,j])+t[i,j]*v[j]*v[i]*  
(b[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])+g[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r7{i in OB : TB[i]==1 || TB[i]==2}: Qmin[i] <= QG[i] <= Qmax[i];
```

Figura 8 – Definição da função objetivo e restrições

Fonte: Autoria própria

## 5.7 Solução do modelo matemático

Em virtude das características da formulação do problema de fluxo de carga deve ser escolhido um solver apropriado para resolver problemas de otimização não-linear. Neste caso, o solver Knitro pode ser usado para solucionar o modelo matemático do problema de fluxo de carga proposto. Assim sendo, em primeiro lugar deve ser escrita a instrução que indica o tipo de solver a ser usado e posteriormente, o nome da função objetivo que deve ser resolvida, tal como apreciado na Figura 9.

```
# *****  
# Solução do modelo matemático  
# *****  
  
option solver knitroampl;  
solve Perdas;
```

Figura 9 – Definição da função objetivo e restrições

Fonte: Autoria própria

## 5.8 Dados de saída

Na ferramenta AMPL é possível usar a função printf para imprimir os resultados seja no prompt de um sistema operativo ou em um arquivo de texto. Desta forma, na Figura 10 é apresentado o código usado para poder imprimir os resultados no prompt do Windows .

```
printf"*****  
printf"***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****  
printf"*****  
printf"\n";  
printf "%5s %7s %5s %9s %9s %9s %8s %9s %9s %11s \n", 'i', 'TB', 'PGi', 'QGi',  
'PDi', 'QDi', 'Pi', 'Qi', 'Vi', 'Thi';  
for {i in OB}{  
    printf "%5d %6d %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %10.4f \n",  
        i, TB[i], PG[i], QG[i], PD[i], QD[i], PG[i]-PD[i], QG[i]-QD[i], V[i], Th[i]*180/3.141592;  
    }  
printf"\n";  
printf"\n";  
printf "%5s %6s %6s %9s %9s %9s %10s %9s \n", 'i', 'j', 'Pij', 'Qij', 'Pji', 'Qji', 'PLij', 'QLij';  
for {(i,j) in OL}  
    {  
        printf "%5d %6d %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f \n", i, j, PL[i, j], QL[i, j],  
            PL[j, i], QL[j, i], PL[i, j]+PL[j, i], QL[i, j]+QL[j, i]+bsh[i, j]*(V[i]^2 + V[j]^2);  
    }  
printf"\n";  
printf"\n";  
printf "Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Floss= %3.4f Qloss= %3.4f \n",  
    sum{(i,j) in OL} (PL[i, j]+PL[j, i]), sum{(i,j) in OL} (QL[i, j]+QL[j, i]+bsh[i, j]*  
    (V[i]^2 + V[j]^2));  
printf "Perdas do sistema (PG menos PD do sistema): Floss= %3.4f Qloss= %3.4f \n",  
    sum{i in OB} (PG[i]-PD[i]), sum{i in OB} (QG[i]+Bsh[i]*V[i]^2-QD[i]+  
    sum{(i,j) in OL} (bsh[i, j]*(V[i]^2+V[j]^2)));
```

Figura 10 – Código usado para apresentar os resultados

Fonte: Autoria própria

O código anterior permite obter os resultados das variáveis que pertencem aos conjuntos  $\Omega_B$  e  $\Omega_L$ , assim como, as perdas de potência do sistema. Cabe destacar que as perdas de potência foram calculadas de duas formas diferentes com o intuito de verificar que o ponto de operação do sistema tenha sido corretamente calculado.

## 5.9 Resolução do modelo matemático e apresentação dos resultados

Levando em consideração o exposto anteriormente, deve-se verificar que os arquivos necessários para poder realizar a simulação estejam contidos na mesma pasta de acordo com a Figura 11.

Nome	Tipo
 AMPL	Aplicativo
 cmd	Atalho
 knitroampl	Aplicativo
 STEE5b	Arquivo DAT
 FC_polar	Arquivo RUN

Figura 11 – Arquivos necessários para a resolução do modelo matemático

Fonte: Autoria própria

Onde os arquivos *AMPL* e *knitroampl* correspondem aos aplicativos que permitem executar o ambiente AMPL e o solver que será usado para resolver o problema, respectivamente. O arquivo *cmd* corresponde ao prompt do Windows. Por fim, os arquivos de texto *FC\_polar.run* e *STEE5b.dat* correspondem ao arquivo principal e o arquivo com os dados do sistema-teste, respectivamente.

Por outro lado, para poder obter os resultados do modelo matemático proposto faz-se necessário escrever no prompt: *AMPL.exe FC\_polar.run*. Dessa maneira, o AMPL retornará um resumo da resolução do modelo matemático proposto usando o Knitro (ver figura 12).

```

Problem Characteristics
-----
Objective goal: Minimize
Number of variables:      29
  bounded below:         0
  bounded above:         0
  bounded below and above: 2
  fixed:                  0
  free:                   27
Number of constraints:    29
  linear equalities:      9
  nonlinear equalities:   20
  linear inequalities:     0
  nonlinear inequalities: 0
  range:                  0
Number of nonzeros in Jacobian: 109
Number of nonzeros in Hessian: 24

  Iter      Objective      FeasError      OptError      !!Step!!      CGIts
-----
  0      1.864512e-002      8.0000e+000      8.987e-009      5.529e-010      0
  6      3.483876e-001      1.044e-014      8.987e-009      5.529e-010      0

EXIT: Locally optimal solution found.

Final Statistics
-----
Final objective value      = 3.48387578413607e-001
Final feasibility error (abs / rel) = 1.04e-014 / 1.30e-015
Final optimality error (abs / rel) = 8.99e-009 / 6.43e-009
# of iterations            = 6
# of CG iterations         = 0
# of function evaluations  = 7
# of gradient evaluations  = 7
# of Hessian evaluations   = 6
Total program time (secs)  = 0.010 < 0.000 CPU time>
Time spent in evaluations (secs) = 0.000

```

Figura 12 – Informações da resolução do modelo matemático usando o solver Knitro

Fonte: Autoria própria

Como visto na Figura 12 aparecem algumas informações relacionadas com a resolução do modelo matemático, tais como, número de iterações, valor da função objetivo, tempo de cômputo, entre outras. Por outro lado, outras informações fornecidas pelo solver Knitro são mostradas na Figura 13.

```

Locally optimal solution.
objective 0.3483875784; feasibility error 1.04e-14
6 iterations; 7 function evaluations
*****
***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****
*****
  i      TB      PGi      QGi      PDi      QDi      Pi      Qi      Ui      Thi
  1      1      3.9484      1.1428      0.0000      0.0000      3.9484      1.1428      1.0000      0.0000
  2      0      0.0000      0.0000      0.0000      2.8000      -0.0000      -2.8000      0.8338      -22.4064
  3      2      5.2000      3.3748      0.8000      0.4000      4.4000      2.9748      1.0500      -0.5973
  4      0      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0193      -2.8340
  5      0      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.9743      -4.5479

  i      j      Pij      Qij      Pji      Qji      PLij      QLij
  1      5      3.9484      1.1428      -3.9230      -0.8049      0.0253      0.3379
  3      4      4.4000      2.9748      -4.3808      -2.7189      0.0192      0.2559
  2      4      -2.9184      -1.3911      3.0368      1.2154      0.1184      1.3157
  2      5      -5.0816      -1.4089      5.2566      2.6302      0.1750      1.9448
  4      5      1.3440      1.5035      -1.3336      -1.8253      0.0104      0.1157

Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Ploss= 0.3484 Qloss= 3.9699
Perdas do sistema (PG menos PD do sistema):      Ploss= 0.3484 Qloss= 3.9699

```

Figura 13 – Valores das grandezas do sistema-teste

Fonte: Autoria própria

Na Figura 13 são apresentados os resultados de todas as variáveis definidas no modelo matemático, assim como, as perdas de potência ativa do sistema-teste. Note que é possível realizar uma rápida validação dos resultados obtidos ao comparar o valor da função objetivo com os valores das perdas de potência ativa.

## 6 | CONCLUSÃO

Neste trabalho os resultados obtidos indicam que a representação do problema de fluxo de carga através da modelagem matemática e, principalmente, a obtenção dos resultados através de um software de otimização matemática amplamente usado em aplicações na Engenharia, constitui-se em uma importante alternativa de solução para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

A linguagem AMPL e o solver Knitro se mostraram eficientes no cálculo do ponto de operação do sistema-teste. Portanto, espera-se que este trabalho possa servir como referência para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

Em trabalhos futuros, faz-se necessário analisar o desempenho da linguagem AMPL e testar o modelo matemático do problema de fluxo de carga para determinar o ponto de operação considerando sistemas-teste da IEEE.

## REFERÊNCIAS

FAVERO, L. P.; BELFIORE, P. Pesquisa operacional para cursos de engenharia. Elsevier, 2013.

FOURIER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. AMPL: A modeling language for mathematical programming. Thomson Publisher, 2003.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. Power system analysis and design. Ed. Cengage Learning, 2011.

HOLMES, D. AMPL (A mathematical programming language) at the University of Michigan. Disponível em: <http://www-personal.umich.edu/~murty/510/ampl.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021.

MADANI, R.; SOJOURI, S.; LAVAEI, J. Convex relaxation for optimal power flow problem: Mesh networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 1, p. 199-211, 2015.

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

OLSZAK, A.; KARBOWSKI, A. Parampl: A simple tool for parallel and distributed execution of AMPL programs. **IEEE Access**, v. 6, p.49282-49291, 2018.

TAMASHIRO, M. A.; GUIMARÃES, G. C.; RODRIGUES, A. R.; SILVA, A. M. B.; CAIXETA, D. A.; MONTEIRO, V. A. Features of present computer tools for load flow calculation and experience acquired with the Improvement of UFUFlow program. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 4, 2016.

## ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS SUBMETIDOS A PIRÓLISE

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 04/05/2021

### **Victória Oliveira Diaz de Lima**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/6616661682554952>

### **Matheus de Paula Gonçalves**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/2434590643385123>

### **Débora Hungaro Micheletti**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/7174805762530986>

### **Fernanda Bach Gasparin**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/3188471370968142>

### **Amanda de Araújo Drago**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/1231611615710991>

### **Aline Bavaresco dos Santos**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/1098847351310417>

### **Adriana Ferla de Oliveira**

Universidade Federal do Paraná  
Palotina – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/8320953119053085>

**RESUMO:** A biomassa residual é uma grande aliada na produção de energia para o suprimento da demanda energética e minimização do aquecimento global. Dessa forma, buscou-se caracterizar as propriedades físico-químicas de briquetes compostos de 50% pó serra e 50% sabugo de milho nas condições *in natura*, torrados e carbonizados, através da análise imediata, da quantificação dos extrativos, do percentual absolutamente seco, e também dos teores de holocelulose e celulose, utilizando métodos normatizados e métodos encontrados na literatura. O percentual absolutamente seco e os teores de holocelulose e de celulose encontrados foram 93,05%, 70,06% e 51,75%, respectivamente. Na análise imediata, foram determinados os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo para as amostras *in natura* (86,25%, 1,57% e 15,35%), torradas (28,50%, 7,54% e 79,05%) e carbonizadas (11,25%, 9,01% e 98,40%), respectivamente. Observou-se um maior potencial para a amostra carbonizada, frente às outras amostras. Com o aumento no teor de carbono fixo com o aumento da temperatura, ficaram também evidenciados valores crescentes na estimativa do poder calorífico dos briquetes *in natura* com 18.851,85 kJ.kg<sup>-1</sup>, torrado com 31.654,40 kJ.kg<sup>-1</sup> e carbonizado com 34.343,37 kJ.kg<sup>-1</sup>. Os resultados indicam que o tratamento térmico contribuiu para melhorar as propriedades energéticas dos briquetes, sendo que a maior temperatura exerceu maior influência.

**PALAVRAS - CHAVE:** Biomassa, torrefação, carbonização, resíduos agroindustriais, biocombustíveis sólidos.

## PHYSICAL AND CHEMICAL ANALYSIS OF LIGNOCELLULOSIC WASTE BRIQUETTES SUBMITTED TO PYROLYSIS

**ABSTRACT:** Residual biomass is a great ally in energy production supplying energy demand and minimizing global warming. Thus, the physical and chemical properties of briquettes composed of 50% saw dust and 50% corn cob was characterized in fresh, roasted and carbonized conditions, through immediate analysis, quantification of extracts, the percentage absolutely dry, also holocellulose and cellulose contents, using standardized methods and literature methods. The percentage absolutely dry and the holocellulose and cellulose levels found were 93.05%, 70.06% and 51.75%, respectively. In the immediate analysis, the contents of volatiles, ash and fixed carbon were determined for the fresh samples (86.25%, 1.57% and 15.35%), toast (28.50%, 7.54% and 79.05%) and carbonized (11.25%, 9.01% and 98.40%), respectively. There was a greater potential for the carbonized sample, compared to the other samples. With the increase in the fixed carbon content with the increase in temperature, there was also evidence of increasing values in the estimation of the calorific value of the briquettes in natura with 18,851.85 kJ.kg<sup>-1</sup>, roasted with 31,654.40 kJ.kg<sup>-1</sup> and carbonized with 34,343.37 kJ.kg<sup>-1</sup>. The results indicate that the heat treatment contributed to improve the energetic properties of the briquettes, with the higher temperature having a greater influence.

**KEYWORDS:** Biomass, roasting, carbonization, agro-industrial waste, solid biofuels.

### 1 | INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia (2011), o consumo de energia aumentará cerca de um terço até os anos de 2010 e 2035. Diante deste cenário, iniciou-se uma busca pelo conhecimento e utilização de fontes renováveis de energia como alternativa para o uso de combustíveis fósseis. Tais fontes são aquelas cujos recursos são naturais e inesgotáveis como a eólica, a solar fotovoltaica, a hidrelétrica e a biomassa, que minimizam o impacto ambiental e o uso de fontes não renováveis (LIMA, 2012).

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo. Desse modo, a realização de estudos para o desenvolvimento de tecnologias que aproveitem as fontes renováveis beneficia comunidades rurais e regiões afastadas (COSBEY, 2011). Além disso, a prática dessas atividades gera um acúmulo significativo de biomassa residual que representa um depósito de energia considerável.

A utilização de resíduos para a geração de energia promove melhora na qualidade ambiental e atende a políticas que visam o reaproveitamento de resíduos com a intenção de promover a sustentabilidade (COUTO, 2014).

O processo de compactação da biomassa durante a produção de briquetes promove o aumento do poder calorífico por unidade de volume, apresentando assim o mesmo montante energético, entretanto, com menor volume, sucedendo de forma que haja a redução do espaço necessário para armazenamento. Além disso, esse processo facilita o transporte, principalmente para locais remotos (DINESHA; KUMAR; ROSEN, 2019).

Quando compactado em forma de pellets ou briquetes, a aplicação destes resíduos

agroindustriais torna-se mais eficiente como substitutivos da lenha em indústrias, laticínios, pizzarias, entre outras. O processo consiste em compactar a serraria, obtendo um produto com alto poder calorífico e benefícios energéticos na geração de energia térmica (DIAS *et al.*, 2012).

Para obter uma maior aplicação dos briquetes, se faz necessário melhorar sua qualidade e desempenho energético por meio de tratamentos térmicos da biomassa, como a torrefação e a carbonização, que proporcionam aumento da densidade energética e a redução da umidade do material (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006).

Diante dos fatores e alternativas citadas acima, o presente estudo tem como objetivo caracterizar as propriedades físico-químicas de briquetes compostos de 50 % pó serra e 50 % sabugo de milho nas condições in natura, torrados e carbonizados, como alternativa eficaz de biocombustível sólido para fins energéticos.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos foram realizados, em triplicata, no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina.

Coletou-se aleatoriamente dois briquetes e retirou-se três discos de 2 cm de espessura para a torrefação e outros três para carbonização, sem a pré-disposição de qual tratamento térmico cada disco receberia. A serragem produzida no corte desses discos foi utilizada para a caracterização in natura dos briquetes.

Após a secagem dos discos em estufa  $105 \pm 2$  °C durante 4 h, foram realizados, em forno tipo mufla, os tratamentos térmicos de torrefação e carbonização.

A torrefação foi realizada segundo metodologia adaptada de Protásio *et al.* (2012) com taxa de aquecimento de  $1,7$  °C  $\text{min}^{-1}$  desde a temperatura ambiente até a temperatura de 300 °C e mantido na mufla durante 30 min após o processo. Por sua vez, a carbonização foi realizada com a mesma taxa de aquecimento e de retenção, entretanto, com temperatura à 450 °C.

Tanto o resíduo do corte como os briquetes torrados e carbonizados foram moídos em moinho Willey e peneirados em conjunto de peneiras de 40 - 60 mesh para a realização da análise imediata pelo método ASTM D-3.172 até D-3.175. Posteriormente, para verificar a qualidade da análise imediata determinou-se o coeficiente de variação por meio do teste de Tukey.

Foram utilizadas metodologias TAPPI T264 cm-97 e TAPPI T257 om-85 para determinar o percentual absolutamente seco, para extrair os componentes macromoleculares holocelulose e celulose, bem como para a quantificação de extrativos por água fria (Eaf), água quente (Eaq) e por NaOH foi realizada de acordo com a bibliografia de Wastowski (2018) e de Mello Junior, (2010).

Por sua vez, a determinação do rendimento gravimétrico foi realizada de acordo

com a metodologia bibliográfica de Protásio *et al.* (2012).

O poder calorífico superior, tanto para a biomassa in natura quanto para as tratadas termicamente, foi calculado de acordo com Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) e Vale *et al.* (2002).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos por meio da análise química da biomassa dos briquetes estão dispostos na Tabela 1.

O teor de umidade é um dos fatores mais importantes a serem analisados por apresentarem uma relação inversamente proporcional ao poder calorífico (PC) e por variarem de acordo com a espécie, o clima e o armazenamento. Uma combustão efetiva e a não redução do poder calorífico requerem teores de umidade abaixo de 10 % (GARCIA, 2010). Por sua vez, o percentual absolutamente seco é o inverso do teor de umidade, podendo chegar a 90 % no material analisado. Assim, de acordo com o resultado exposto na Tabela 1, verifica-se teor absolutamente seco de 93,05%, infere-se que o valor de umidade seja satisfatório.

Madeiras com valores elevados de extrativos e lignina apresentam maior poder calorífico se comparadas às madeiras com menores quantidades desses compostos por apresentarem menos oxigênio do que na celulose e hemicelulose (QUIRINHO *et al.*, 2004). A porcentagem de extrativos pode atingir até no mínimo 20 %, assim, com base nos resultados da Tabela 1, a amostra em estudo apresentou Eaf 8,50 %, Eaq 10,97 % e ENaOH 21,16 %, sugere-se que estes também contribuam para o aumento do poder calorífico dos briquetes in natura (PETTERSON, 1984).

A celulose representa uma parcela importante na geração de energia por meio da queima direta, por ser o maior componente da madeira em massa e volume (SANTOS; COLODETTE; QUEIROZ, 2013). O resultado encontrado para celulose (51,77%) apresenta-se coerente e implica em uma maior geração de energia por unidade de massa, sendo semelhante à de pinus.

Análise	Briquet es	<sup>1</sup> E. urograndi s*	<sup>1</sup> E. uroplyll a	<sup>2</sup> Pinus oocarp a	<sup>3</sup> Eucalipto grandis	<sup>4</sup> Pinus taeda	<sup>5</sup> Pinus oocarp a
Percentual absolutame nte seco (%)	93,05	-	-	-	-	-	-
Eaf (%)	8,50	5,97	2,63	-	-	-	-
Eaq (%)	10,97	3,4	2,1	-	-	-	-
Extrativos em NaOH (%)	21,16	15,82	12,02	-	-	-	-
Holocelulos e (%)	70,06	-	-	65,21	69,18	-	-
Celulose (%)	51,75	-	-	-	-	55,80	59,05

Tabela 1 - Resultados da caracterização química dos briquetes analisados.

**Fonte:** <sup>1</sup>MOREIRA; FAZION; RIBEIRO, (2016); <sup>2</sup>RODRIGUES; HILLIG; MACHADO, (2009); <sup>3</sup>MORI *et al.*, (2003); <sup>4</sup>RIGATTO; DEDECEK; MATOS, (2004); <sup>5</sup>MORAIS; NASCIMENTO; MELO (2005).

As principais características do briquete são o poder calorífico, os materiais voláteis, as cinzas e o carbono fixo (COSTA; MORAIS, 2011). Após um tratamento térmico o teor de cinzas e carbono fixo tendem a aumentar e o de voláteis a diminuir (LIMA; MICHELETTI; OLIVEIRA, 2019). Os resultados obtidos com os tratamentos propostos para a amostra do briquete apresentaram um comportamento condizente com a literatura, como exposto na Tabela 2.

Neste estudo, o aumento do teor de carbono fixo após o tratamento térmico foi satisfatório. Devido ao fato desse teor estar relacionado à porcentagem de carbono disponível para combustão, o alto valor identificado influencia positivamente no poder calorífico (EFOMAH; GBABO, 2015).

O teor de materiais voláteis contribui para o poder calorífico de forma contrária ao teor de carbono fixo, ou seja, um aumento no teor de voláteis acarreta em uma diminuição no teor de carbono fixo, o que diminui o poder calorífico da biomassa. Dessa forma, durante o processo de tratamento térmico ocorre o decréscimo do teor de voláteis e aumento do teor de carbono fixo assim como observa-se na Tabela 2. Os dados da literatura, citados na Tabela 2, apresentam maiores teores de voláteis, cerca de 27-57% e 55-60%, demonstrando grande viabilidade da amostra em estudo, tendo em vista a obtenção de um maior teor de carbono fixo, influenciando positivamente no PCS.

Os resultados para o teor de cinzas das amostras em estudo são superiores àqueles encontrados na literatura (Tabela 2) para serragem de eucalipto e de pinus, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus spp.* Essa variação entre teores de cinzas se dá de acordo com a espécie utilizada para a produção do combustível (SANT'ANNA, 2012).

Amostra	Teor de voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de Carbono fixo (%)
<i>In natura</i>	<b>86,25*</b>	<b>1,57*</b>	<b>15,35*</b>
	80,54 <sup>1</sup>	1,57 <sup>1</sup>	17,9 <sup>1</sup>
	81,16 <sup>1</sup>	0,23 <sup>1</sup>	18,61 <sup>1</sup>
Torrada	<b>28,50*</b>	<b>7,54*</b>	<b>79,08*</b>
	40,51 <sup>2</sup>	1,26 <sup>2</sup>	58,22 <sup>2</sup>
	67,18 <sup>3</sup>	0,27 <sup>3</sup>	32,55 <sup>3</sup>
Carbonizada	<b>11,25*</b>	<b>9,01*</b>	<b>98,40*</b>
	27,40 <sup>4</sup>	1,60 <sup>4</sup>	71,00 <sup>4</sup>
	25,48 <sup>3</sup>	1,09 <sup>3</sup>	66,28 <sup>3</sup>

Tabela 2 - Resultados de análises imediatas das amostras nas condições *in natura*, torrada e carbonizada.

**amostra em estudo\***; <sup>1</sup>SILVA *et al.* (2015) – Serragem de Pinus e Eucalyptos spp, <sup>2</sup>BORGES (2015) - Eucalyptus grandis, <sup>3</sup>BATISTA (2015) – Pinus Elliotti, <sup>4</sup>SANTIAGO; ANDRADE, (2005) – Eucalyptus urophylla.

Valores de coeficientes de variância inferiores ou próximos a 10 % implicam em uma boa precisão entre os dados obtidos, uma vez que a exatidão do experimento é inversamente proporcional ao coeficiente de variância, ou seja, quanto menor o valor de coeficiente de variância maior a qualidade dos dados (CARGNELUTTI FILHO; STORCK, 2007). Sendo assim, os coeficientes de variância determinados por meio da análise foram de 3,21 %, 2,45 % e 13,79 % para teor de voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente, apresentaram-se inferiores ou próximos a 10 %. Desta forma, pode-se considerar que os resultados obtidos no presente estudo possuem uma boa qualidade e precisão.

Os tratamentos térmicos causam uma perda de massa aos materiais devido a degradação dos componentes químicos da madeira, principalmente as hemiceluloses e componentes voláteis. Essa perda varia de acordo com o tipo de biomassa, temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência, de modo que um baixo rendimento gravimétrico indica maior remoção desses voláteis (YILDIZ; GEZER; YILDIZ, 2006). De acordo com os rendimentos obtidos conforme a Tabela 3, afirma-se que o material deste estudo apresentou melhor eliminação de voláteis se comparado aos listados a partir da literatura.

Condição	Rendimento Gravimétrico (%)	
	Briquete	Literatura
Torrada	<b>32,42*</b>	43,39 <sup>[35]</sup>
Carbonizada	<b>26,41*</b>	30,06 <sup>[32]</sup>

Tabela 3 - Rendimento gravimétrico das amostras torradas e carbonizadas.

**amostra em estudo\***; JUNIOR, (2014) – *Eucalyptus urograndis*, SANTIAGO; ANDRADE, (2005) – *Eucalyptus urophylla*.

A partir dos resultados da Tabela 3, pôde-se perceber a influência da temperatura nos processos de torrefação e carbonização, pois à medida com que a faixa de temperatura do processo de pirólise aumentou, os macrocomponentes se degradam em maior quantidade. Isso porque a hemicelulose degrada-se primeiro, numa faixa de temperatura de 200 a 300°C, seguido pela celulose, na faixa de 300 a 400 °C e, por último, tem-se que a lignina se decompõe numa faixa de temperatura mais ampla, entre 250-500 °C. (BORGES, 2015).

Por fim, os resultados da estimativa do poder calorífico estão apresentados na Tabela 4, sendo possível observar valores próximos aos encontrados na literatura para os briquetes *in natura* e carbonizado, enquanto o briquete torrado apresentou valores superiores. Os materiais que apresentam maiores valores de poder calorífico superior estão associados ao fato de possuírem maiores valores de carbono fixo (PROTÁSIO *et al.*, 2012). Dessa forma, são observados ganhos de poder calorífico de 67% e 82% com a torrefação e carbonização, respectivamente, representando um ganho de eficiência no uso da biomassa.

Condição	Poder Calorífico (kJ.kg <sup>-1</sup> )		
	Briquete	Literatura	
<i>in natura</i>	<b>18.851,8*</b>	20.062,3 <sup>1</sup>	18.547.7 <sup>1</sup>
Torrado	<b>31.654,4*</b>	20.932,6 <sup>2</sup>	22.650,0 <sup>3</sup>
Carbonizado	<b>34.343,4*</b>	28.459,6 <sup>4</sup>	36.723,0 <sup>5</sup>

Tabela 4 - Poder Calorífico Superior das amostras.

**amostra em estudo\***; <sup>1</sup>BOAS, (2011) - *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus sp.* <sup>2</sup>COSTA *et al.*, (2015) - *Eucalyptus sp.* <sup>3</sup>RODRIGUES; ROUSSET, (2015) - *eucalyptus grandis*. <sup>4</sup>NONES *et al.*, (2014) - *Eucalyptus benthamii*. <sup>5</sup>LIMA *et al.*, (2007) - *Eucalyptus benthamii*.

Portanto, com os resultados obtidos, notou-se o potencial dos briquetes estudados para a geração de energia alternativa.

## 4 | CONCLUSÃO

No presente estudo, obteve-se briquetes pirolisados a partir da utilização dos equipamentos laboratoriais, onde foi possível realizar a análise desse material, podendo então ser observadas as diferenças físico-químicas entre a biomassa *in natura*, torrificada e carbonizada.

A biomassa dos briquetes, composta por 50 % de pó de serra e 50 % de sabugo de milho, apresentou valores de percentual absolutamente seco, extrativos em geral, holocelulose e celulose condizentes com a faixa de resultados encontrados na literatura para as biomassas de *Pinus* e Eucalipto, madeiras amplamente utilizadas a nível comercial para fins energéticos.

Na análise imediata observou-se um baixo teor de voláteis e um elevado teor de carbono fixo após os tratamentos térmicos, o que influenciou positivamente no poder calorífico superior do combustível. Portanto, através da estimativa, destaca-se o processo de torrefação, que apesar de ser utilizada uma temperatura menor, apresentou um PCS próximo ao processo de carbonização.

Os baixos rendimentos gravimétricos das amostras indicaram que o processo de eliminação dos materiais voláteis foi eficaz.

## REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing Materials. ASTM D 1762: **Standard method for chemical analyses of wood charcoal**. Philadelphia: ASTM International, 1977. 1042p.

Batista, J. A. N. **Torrefação do *Pinus elliottii* para fins energéticos**. 2015.

Boas, M. A. V. **O efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

Borges, A. C. P. **Caracterização energética do cavaco de *eucalyptusgrandis* “in natura” e torrefeito**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. **Estatísticas de avaliação da precisão experimental em ensaios de cultivares de milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.42, p.17-24, 2007.

COSBEY, A. TRADE. **Sustainable development and a green economy: Benefits, challenges and risks**. The Transition to a Green Economy: Benefits, Challenges and Risks from a Sustainable Development Perspective. p. 40, 2011.

COSTA, E. V. S.; ROCHA, M. F. V.; CÁSSIA, A.; CARNEIRO, O.; SILVA, C. M. S.; PEREIRA, B. L. C.; JERÁSIO, J. **Influência da torrefação nas propriedades dos briquetes produzidos com madeira de eucalyptus sp.** II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, 2015.

COSTA, G, P; MORAES, J, T. **A Fabricação de Briquetes como Alternativa para Destinação Adequada dos Resíduos de Madeira na Indústria Moveleira no ES.**5 p. Vitória, 2011. Disponível em: <<http://faesa.br/SEA/>>. Acesso em: 15/05/2015.

COUTO, C. M. **Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas - RS.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). 56f. Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: 2014.

DIAS, J. D. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H.; BARBOSA, P. F.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e pêletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** Embrapa Agroenergia-Documents (INFOTECA-E), 2012.

DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. **Biomass briquettes as an alternative fuel: A comprehensive review.** Energy Technology, v. 7, n. 5, p. 1801011, 2019.

EFOMAH, A. N.; GBABO, A. **The Physical, Proximate and Ultimate Analysis of RiceHusk Briquettes Produced from a Vibratory Block Mould Briquetting Machine.** International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, v. 2, n. 5, p. 814-822, 2015.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de Pellets de madeira produzidos no Brasil.** 2010. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. Dissertação de mestrado.

International Energy Agency. **World energy outlook 2011.** Paris, 2011.

JUNIOR, S. D. M. **Rendimento e características da biomassa torrada e carbonizada do clone de eucalyptus urograndis.** Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2014.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J. **Caracterização individual de árvores de Eucalyptus benthamii para uso energético.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa, Colombo, n. 35, 2007. 26 p.

LIMA, R. A. **A produção de energias renováveis e o desenvolvimento sustentável: uma análise no cenário da mudança do clima.** Revista Direito E-nergia, 2012.

LIMA, V. O. D.; MICHELETTI, D. H.; OLIVEIRA, A. F. **Caracterização física e energética de briquetes de Guandu submetidos a tratamento térmico.** Toledo: II Simpósio em Bioenergia, Unioeste, 2019.

MELLO JUNIOR, J. A. **Polpação kraft e kraft/AQ da madeira de híbrido de Eucalyptus urograndis destinada à produção de polpa para dissolução.** Dissertação de Mestrado. Guaratinguetá, 2010.

MORAIS, S. A. L. DE; NASCIMENTO, E. A. DO; MELO, D. C. **Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis.** Revista Árvore, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MOREIRA, E. L.; FAZION, H.; RIBEIRO, E. S. **Variação dos Teores de Extrativos de Três Espécies Florestais**. 2016. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b0ff/8343a21c33480253f43209cede5ee76ba700.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

MORI, F. A.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; CARDOSO, M. D. G. **Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar**. Food Science and Technology, v. 23, n. 3, p. 396-400, 2003.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. **Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de Eucalyptus benthamii**. Floresta, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2014.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. Fuel, v. 84, n. 5, p. 487-494. 2005.

PETTERSON, R. C. **The chemical composition of wood**. Washington, American Chemical Society, 1984.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. **Torrefaction of wood: Part 2**. Analysis of products. Journal of analytical and applied pyrolysis, v. 77, n. 1, p. 35-40, 2006.

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. D. S. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATOS, J. L. M. **Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de Pinus taeda para produção de celulose Kraft**. Revista Árvore, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2004.

RODRIGUES, C. K.; HILLIG, E.; MACHADO, G. de O. **Análise química da madeira de Pinus Oocarpa**. Semana de Integração Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 1, p. 2009, 2009.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. **Effects of torrefaction on energy properties of Eucalyptus grandis wood**. Cerne, v. 15, n. 4, p. 446-452, 2015.

SANT'ANNA, M. C. S.; LOPES, D. F. C.; CARVALHO, J. B. R.; SILVA, G. D. **Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 14, n. 3, p. 289-294, 2012.

SANTIAGO, A. R.; ANDRADE, A. M. **Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto**. Ciência Florestal, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: Os Editores, 2013.

SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; ROZ, A. L. DA; YAMAJI, F. M. **Caracterização de biomassas para a briquetagem**. Floresta, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015.

TAPPI Technical Divisions And Committees. **TAPPI T264 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: Tappi Technical Divisions and Committees, 2007.

TAPPI Technical Divisions And Committees. **TAPPI T257 om-85: Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: Tappi Technical Divisions and Committees, 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos**. Biomassa & Energia, Brasília, v. 1, n.2, p. 173-182, 2004.

VALE, A. T.; ABREU, V. L. S.; GONÇALEZ, J. C; COSTA, A. F. **Estimativa do Poder Calorífico Superior do Carvão Vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do Teor de Carbono Fixo e do Teor de Material Volátil**. Revista Brasil Florestal, nº 73, 2002.

WASTOWSKI, A. D. **Química de madeira**. 1ª Ed. Editora intercência, 2018.

YILDIZ, S., GEZER, D., YILDIZ, U. **Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat**. Buildingand Environment, Oxford, v. 41, n. 12, p. 1762- 1766, Dec. 2006.

# CAPÍTULO 6

## ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA NO CAMPUS UFRPE - UACSA

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 25/05/2021

### Reinel Beltrán Aguedo

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA)  
<http://lattes.cnpq.br/2770313428458626>

### Paula de Tarsia Borba de França

Unilever Industrial Suape  
<http://lattes.cnpq.br/3042514350705500>

### Ania Lussón Cervantes

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA)  
<http://lattes.cnpq.br/5793691069517813>

**RESUMO:** O artigo apresenta um estudo sobre a viabilidade da instalação de um sistema de geração de energia fotovoltaica nas instalações da UFRPE-UACSA. O estudo foi realizado utilizando o simulador PV\*SOL premium 2019, para análise de sombreamento, a fim de alcançar um aumento na eficiência do sistema. Ao final do estudo, constatou-se que o prazo médio de retorno financeiro é de seis anos, mostrando a viabilidade do projeto e incentivando práticas de sustentabilidade no setor público.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sombreamento, viabilidade, sistemas fotovoltaicos, sustentabilidade.

### IMPLEMENTATION STUDY OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK AT CAMPUS UFRPE - UACSA

**ABSTRACT:** The article presents a study on the feasibility of installing a photovoltaic power generation system at the UFRPE-UACSA facilities. The study was carried out using the PV\*SOL premium 2019 simulator, for shading analysis, in order to achieve an increase in the system efficiency. At the end of the study, it was found a period of six years for the average financial return, showing the feasibility of the project and encouraging sustainability practices in the public sector.

**KEYWORDS:** Shading, feasibility, photovoltaic systems, sustainability.

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo Nascimento e Rütther (2014), a geração fotovoltaica (FV) é uma fonte de energia elétrica que converte diretamente a energia do sol de maneira silenciosa, não poluente e sem utilizar partes móveis. Isto torna esta fonte de energia um importante complemento à matriz elétrica, com alta confiabilidade e robustez, com baixa necessidade de operação, manutenção e reposição (OM&R).

De acordo com Moraes (2017), esse modelo de geração de energia elétrica está em expansão no mundo, de modo que cada vez mais a preocupação é justamente elevar o nível de preservação ambiental. A tendência mundial

é aproveitar mais a fonte de energia solar que, ao ser largamente utilizada, terá custos de implantação cada vez mais reduzidos.

A energia solar FV é uma fonte de energia renovável promissora, pois ela é capaz de ser facilmente instalada no meio rural e urbano, podendo gerar toda a energia que outrora era adquirida pela concessionária, através da rede elétrica, além de ser um sistema que não produz lixo tóxico, não polui o meio ambiente, e não envolve nenhum impacto ambiental ou social (CASARO, M. M.; MARTINS, D. C., 2010).

De fato, como em qualquer forma de geração de energia, deve-se ter cautela ao analisar sob quais condições o sistema funcionará, como também realizar o dimensionamento correto da instalação. Nesse tipo de geração de energia, é de extrema importância verificar detalhadamente as sombras que podem atingir os módulos fotovoltaicos, pois sem o estudo adequado do sombreamento, além de provocar uma diminuição na geração, também é capaz de danificar permanentemente os módulos.

Assim, o principal objetivo deste artigo é analisar a viabilidade da implementação de um sistema de geração FV conectado à rede elétrica na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE-UACSA), considerando a possibilidade de sombreamento. Para isto, primeiramente são tratados alguns aspectos teóricos sobre a escolha e o posicionamento de módulos fotovoltaicos, seguidamente são feitos os cálculos e considerações para a instalação de um sistema fotovoltaico nos edifícios da UFRPE-UACSA utilizando o software PV\*SOL *premium* 2019. Por fim, é analisado o estudo de viabilidade, e finalmente são dadas algumas conclusões.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A radiação solar é composta por ondas eletromagnéticas que ao incidirem sobre certos materiais pode haver transmissão de calor ou efeitos elétricos, como o fotovoltaico e fotoelétrico.

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar FV para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou tensão elétrica, sobre uma célula formada por sanduíche de materiais semicondutores (VILLALVA, M.; GAZOLI, J., 2015).

### 2.1 Captação de Radiação

Segundo Villalva e Gazoli (2015), os módulos fotovoltaicos captam a radiação global, ou seja, a radiação direta somada à difusa. A radiação direta é composta por raios solares que incidem diretamente sobre o plano horizontal, e a difusa é composta por raios solares que chegam indiretamente ao plano.

A radiação é quantificada através da irradiância, expressa em unidade de potência

por área. De acordo com Villalva e Gazoli (2015), ao medir a irradiância ao longo de um dia, pode-se calcular a quantidade de energia recebida do Sol por uma determinada área.

A Figura 1 representa a curva característica do perfil de irradiância ao longo do dia. De acordo com a localização, os valores de irradiância mudam.

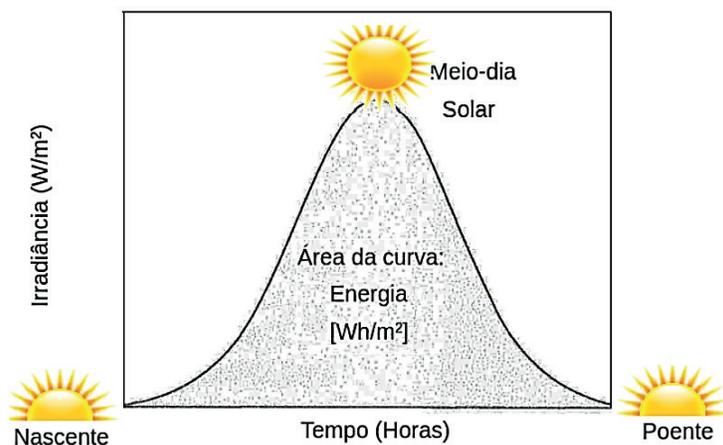


Figura 1 - Curva característica do perfil de irradiância ao longo do dia

Fonte: VILLALVA, M.; GAZOLI, J. (2015)

Na Figura 1, a área abaixo da curva é denominada insolação, que expressa a densidade de energia por área, obtida através do cálculo da integral da curva.

## 2.2 Módulos Fotovoltaicos

Existem diversas tecnologias para a fabricação de módulos fotovoltaicos, sendo a célula de silício monocristalino a mais fabricada e utilizada comercialmente, visto que esta possui uma maior eficiência. A eficiência do módulo depende também de fatores externos, como por exemplo, sua inclinação em relação aos raios solares e o sombreamento.

O sombreamento parcial em um painel fotovoltaico pode proporcionar baixo ou até mesmo nenhum índice de radiação solar sobre algumas células fotovoltaicas. Conforme mencionado em Villalva e Gazoli (2015), quando uma célula fotovoltaica recebe pouca ou nenhuma luz, isso impede que a corrente elétrica seja transmitida para as demais células, visto que as mesmas estão em série. Atualmente nos módulos existem diodos de *bypass* (diodos de passagem) ligados em paralelo com as células, impedindo que haja corrente reversa, a fim de minimizar possíveis danos aos módulos causados pelo sombreamento.

A Figura 2 mostra o arranjo das células fotovoltaicas com diodo *bypass*. Segundo Rauschmayer (2019), se a sombra atingir apenas uma fileira do conjunto de células em série, a corrente continuará a circular nas outras duas fileiras, devido ao caminho de desvio proporcionado pelo diodo polarizado.

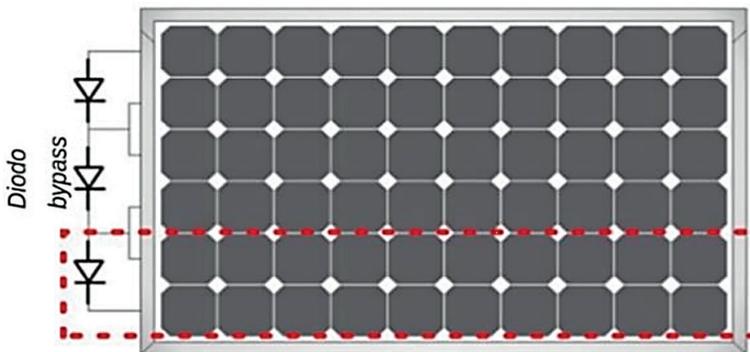


Figura 2 - Painel solar com 72 células fotovoltaicas com diodo bypass

Fonte: PEROZA, J.; RAMPINELLI, G. A. (2018)

Como pode ser visto através da Figura 2, as fileiras de células em série estão dispostas verticalmente no módulo fotovoltaico. Devido a isso, ao instalar os módulos fotovoltaicos, é preciso levar em consideração o formato do sombreamento do local (caso haja), para definir se o painel deve estar na vertical ou horizontal.

### 2.3 Posição dos Módulos Fotovoltaicos

Em concordância com Villalva e Gazoli (2015), em cada ponto do planeta a radiação direta incide sobre o solo com diferentes ângulos de inclinação, variando durante os dias e meses ao longo do ano. De fato, não há uma posição ótima para a instalação de módulos a fim de melhorar a captação de radiação indireta, visto que essa chega ao solo de modo irregular e aleatória, entretanto, os mesmos podem ser posicionados de forma a otimizar a recepção de radiação direta. Assim, a posição que otimiza a conversão de radiação solar em energia elétrica é a que expõe o módulo de forma perpendicular à radiação direta.

Um módulo fixo deve ser orientado com sua face voltada para o geográfico. Caso o local da instalação seja acima da linha do Equador, devem estar orientados para o sul geográfico. Essa disposição dos módulos melhora o aproveitamento de luz solar durante o dia. Ao meio-dia solar, horário na qual há uma maior incidência de radiação solar, o módulo fotovoltaico estará perpendicular à radiação direta, obtendo, assim, um melhor aproveitamento. Nos diversos horários, o módulo não estará perpendicular à radiação direta, mas ainda assim estará recebendo os raios solares sobre a superfície, maximizando a produção média diária de energia.

### 2.4 Escolha de Inclinação do Módulo Solar

De acordo com Villalva e Gazoli (2015), diversos fatores influenciam a determinação do ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) do módulo (ver Figura 3) tal que a radiação direta chegue de forma perpendicular ao mesmo, como a altura solar, o ângulo incidente dos raios com relação ao plano horizontal, entre outros.

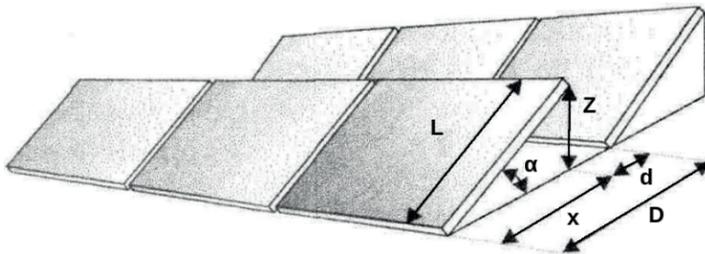


Figura 3 - Fileiras de módulos fotovoltaicos

Fonte: VILLALVA, M.; GAZOLI, J. (2015)

Para a instalação dos módulos, deve-se calcular a altura da haste de fixação ( $z$ ), levar em conta o comprimento do módulo ( $L$ ) ou a distância entre a borda do módulo no solo e a barra de sustentação ( $x$ ). Assim, a altura  $z$  é calculada através de (1), e a distância  $x$  por (2).

$$z = L \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$x = L \cos(\alpha) \quad (2)$$

Para sistemas fotovoltaicos de médio a grande porte, normalmente os módulos ficam dispostos em fileiras colocadas umas atrás das outras, provocando um sombreamento. Por esse motivo, a distância entre as fileiras deve ser calculada corretamente a fim de que a sombra gerada por uma não atinja a outra, já que prejudica o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Utilizando a estratégia de maximização de eficiência do sistema fotovoltaico (VILLALVA, M.; GAZOLI, J., 2015), isto é, diminuindo as perdas provocadas por sombras, a regra de espaçamento entre fileiras ( $d$ ) é:

$$d = 3,5z \quad (3)$$

A seguir será realizado um estudo de caso da viabilidade da instalação de um sistema de geração de energia FV nas instalações da UFRPE-UACSA.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A UACSA está localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, PE, em dois edifícios, A e B, de área superior idêntica, porém espelhados, como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 - Vista superior dos edifícios da UFRPE - UACSA

Fonte: GOOGLE EARTH (2019)

O projeto sugere que a instalação dos módulos fotovoltaicos seja realizada na cobertura dos edifícios, na qual cada um deles dispõe de 570,21 m<sup>2</sup> de área livre. O estudo será realizado para o edifício A, mas o resultado final será dado para os dois, visto que ambos são espelhados.

### 3.1 Potência do Sistema Fotovoltaico

A média do histórico de consumo da UACSA é de 27.799 kWh. A potência que deve ter um sistema fotovoltaico para suprir o consumo é determinada pela equação (4), onde 120 é o produto de considerar os fatores como: horas de sol pico (5 horas), perdas elétricas globais (0,8), e a quantidade de dias em análise (30 dias). Assim, para o caso de estudo, a potência deve ser de 232 kW.

$$Potência(kW) = \frac{consumo(kWh)}{120} = \frac{27799kWh}{120} = 232 kW \quad (4)$$

Para o cálculo do espaçamento entre as fileiras, faz-se necessário o conhecimento prévio das dimensões do painel fotovoltaico. Para isto foi selecionado o módulo solar Mono Half-cell BYD MIK-36-SERIES-5BB 400W, cujas especificações estão discriminadas na Tabela I.

Tipo de Célula	MONO
Quantidade de Células	144
Potência	400 W
Eficiência	19,88 %
Dimensão	2008 X 1002 X 35 mm
Área	2,012 m <sup>2</sup>

Tabela I – Modulo Mono Half-cell BYD MIK-36-SERIES-5BB 400W

Fonte: BYD (2020)

Através de (5) é possível conhecer a quantidade de módulos ( $Q_m$ ) que podem ser instalados na área disponível ( $A_d$ ), considerando a área de cada módulo fotovoltaico ( $A_m$ ).

$$Q_m = \frac{A_d}{A_m} = \frac{570,21 \text{ m}^2}{2,012 \text{ m}^2} = 283 \quad (5)$$

Assim, tem-se que na área considerada poderiam ser instalados 283 módulos fotovoltaicos, mas sem considerar o espaçamento entre as fileiras.

### 3.2 Espaçamento entre fileiras de módulos

Um espaçamento entre as fileiras é necessário para evitar o sombreamento, como também para manutenções nos módulos. Para determinar tal espaçamento, deve ser levado em consideração o ângulo de inclinação, a posição do painel (horizontal ou vertical), e o comprimento do mesmo.

Para Pernambuco, o ângulo  $\alpha$  pode variar de 0° a 15° em relação ao plano horizontal, conforme mostrado na Figura 5. Dessa maneira, o módulo estará na posição ótima para a captação da radiação solar.

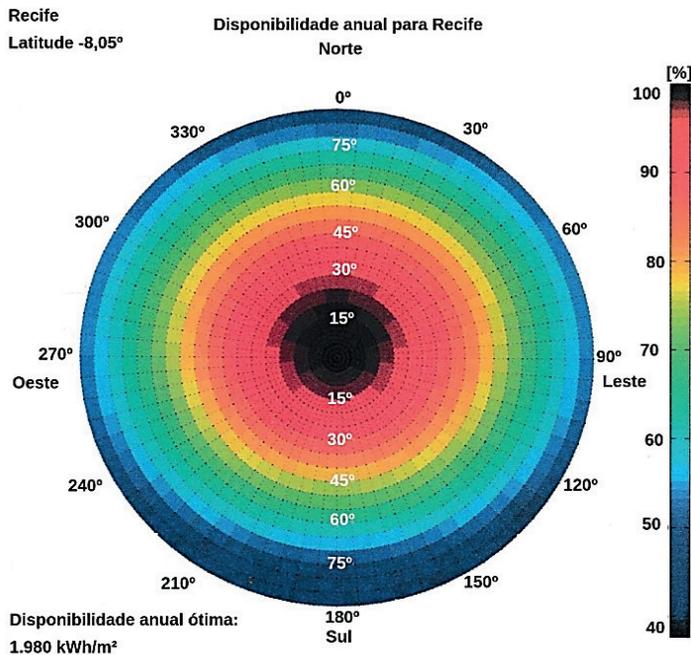


Figura 5. Perdas segundo a orientação e inclinação do gerador fotovoltaico para Recife

Fonte: ZILLES, R., *et al.* (2012)

De acordo com Villalva e Gazoli (2015), ângulo de inclinação deve ser tal que sejam evitados acúmulos de poeiras sobre os módulos. Assim, com  $\alpha = 8^\circ$ , evita-se acúmulo de poeira e reduz-se a distância entre as fileiras, maximizando a quantidade de módulos a serem instalados. Dessa maneira, utilizando os dados da Tabela I, considerando que os módulos estejam na posição vertical ( $L = 2008 \text{ mm}$ ), a distância ( $d$ ) entre as fileiras é de 0,98 m.

### 3.3 Análise de sombreamento

A disposição dos módulos deve ser de maneira tal que o avanço da sombra produzida pelas edificações não comprometa a geração FV. Dado que o descasamento, ou seja, quando as características elétricas de módulos interconectados não são iguais, segundo Rauschmayer (2019), não somente causa perdas, mas também pode danificar os módulos.

No momento em que uma célula é sombreada, ela deixa de produzir energia elétrica e passa a consumir, pois vira resistência. Por consequência, a célula aquece (efeito *hot spot*), e sem proteção, este aquecimento poderia até derreter a célula. Por isso, os módulos contam com diodos de desvio (*bypass*), que conduzem a corrente reversa, tirando as células inoperantes do circuito, conforme é dito por Rauschmayer (2019).

Na Figura 6 é mostrado o sombreamento para o solstício de inverno, 21 de dezembro de 2019, que representa a pior condição de sombreamento nas regiões A e B. Serão

considerados em dois horários, 8:00h e 15:00h, para analisar o movimento da sombra.



Figura 6 - Sombreamento produzido para o solstício de inverno, dia 21 de dezembro

Fonte: PV\*SOL *premium*, (2019)

O sombreamento na região B tem uma leve variação no decorrer dos dias ao longo do ano, mas sempre avança da esquerda para a direita. Isso indica que os módulos devem ser posicionados na posição vertical com a inclinação adequada para o norte. Por outro lado, como na parte superior dos edifícios há uma mureta de 1,34 m, tendo em vista diminuir as perdas pelo sombreamento desta, os módulos podem ser instalados numa estrutura de altura igual à da mureta, e colocar as fileiras para a mais direita possível no edifício.

A visualização das sombras, dadas na Figura 6, ajuda a compreender as causas do sombreamento, mas retrata apenas certos instantes de tempo. Assim, segundo Rauschmayer (2019), o cálculo do percentual das horas com sombra ao longo do ano é uma informação mais rica, e ajuda a tomar decisões sobre o arranjo dos módulos.

Para ter o percentual anual de perdas, é usado o *software* PV\*SOL *premium* 2019. Segundo Solarize (2019), o mesmo é um dos mais utilizados para a simulação de sistemas de energia solar. As perdas por área são apresentadas na Figura 7, consideração os módulos na posição vertical, elevados a 1,34 m, e com inclinação de 8° para o norte. A porcentagem que aparece sobre cada módulo refere-se à perda percentual anual. Os que não possuem essa porcentagem, não terão perdas por sombreamento.



Figura 7 - Frequência de sombreamento ao longo do ano nas respectivas áreas

Fonte: PV\*SOL premium, (2019)

Finalmente, considerando que o espaçamento entre as fileiras vai reduzir a quantidade total de módulos fotovoltaicos que podem ser colocados na área em questão, assim como a geometria do local onde serão instalados, as especificações da instalação do sistema de geração de energia fotovoltaica estão dispostas na Tabela II.

Potência da Planta (kW)	251,2
Potência do inversor (kW)	250
Tipo de inversor	SMA
Tipo de telha	Laje
Tipo de sistema	Trifásico
Quantidade de módulos	2128

Tabela II – Especificações da instalação

Fonte: ALDO (2021)

Conforme mostrado na Tabela II, a potência total do sistema de geração será de 102,4 kW, contendo 256 módulos de 400 W cada um, com dois inversores com potência de 50 kW cada um, trifásico da marca SMA, juntamente com estrutura de fixação tipo laje em cada edifício.

#### 4 | VIABILIDADE

O número mínimo de anos necessários para recuperar o investimento inicial é chamado de período de recuperação de investimento (*Payback*) (BANDEIRA DA

FONTOURA, F. B.; RABUSKE, R.; FRIEDRICH, L. R., 2018). Com a capacidade de consumo devido à potência gerada, é possível realizar o estudo de *Payback*, analisando quando o investimento será compensado. Assim, considerando que a mão de obra seja em torno de 15% do preço total do *kit* fotovoltaico, o investimento total, apresentado na Tabela III, é calculado considerando (6).

$$CT = 1,5CFV \quad (6)$$

onde *CT* e *CFV* representam o custo total do investimento e dos *kits* fotovoltaicos, respectivamente.

Edifício	Custo (R\$) por kit fotovoltaico	Custo (R\$) da Mão de Obra	Custo Final (R\$)
A	200.109,00	30.016,35	230.125,35
A+B	400.218	60.032,7	460.250,7

Tabela III - Tabela de Investimento

Fonte: Elaborada pelos autores

Segundo a ANEEL (2021), o custo do kWh da concessionária Celpe, classificação B3 - Comercial, Serviços e Outras atividades, é R\$ 0,57434. Os dados da Tabela IV reúnem todas as informações necessárias para gerar o gráfico do *Payback*, como também o retorno financeiro, conforme a Figura 8.

<b>Dados do Investimento</b>	
Capital de Investimento (R\$)	460.250,7
Planta FV (Wp)	251,2
Produção (kWh / mês)	12.288,0
Valor do kWh	0,57434
<b>Retorno Financeiro</b>	
Capital de Investimento (R\$)	460.250,7
Retorno do Investimento (Anos)	6
Economia estimada no 1º ano (R\$)	R\$ 84.689,88

Tabela IV- Dados financeiros

Fonte: Elaborada pelos autores

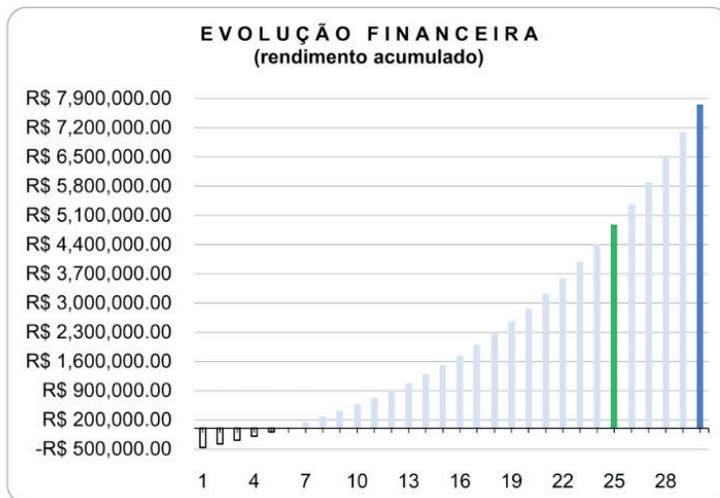


Figura 8 - Gráfico de Payback

Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 8, é possível observar que nos primeiros cinco anos, o capital de investimento ainda está sendo compensado, através do abatimento na fatura de energia elétrica, por meio da produção de energia produzida pelo sistema fotovoltaico. A partir do sexto ano, o rendimento acumulado inicia a compensação do valor investido, sendo crescente ao longo dos anos. A coluna em verde representa a economia estimada em 25 anos de R\$ 4.870.002,63, enquanto a azul, R\$ 7.759.942,35 para 30 anos.

## 5 | CONCLUSÕES

A análise de sombreamento é essencial para aproveitar ao máximo a eficiência de um sistema de geração de energia fotovoltaica, visto que este é de fácil estudo, instalação e de retorno financeiro viável.

Após realizar o estudo de caso, é percebido que devem ser seguidos alguns procedimentos para otimizar geração de energia no ambiente proposto. Uma estratégia é elevar a estrutura dos módulos fotovoltaicos à 1,34 m, a fim de diminuir as perdas por sombreamento provocado pela mureta.

Constatou-se que o retorno financeiro, ou seja, a relação entre o capital ganho como resultado do investimento e a quantidade de capital investido para o sistema fotovoltaico, para o caso de estudo, se inicia a partir do sexto ano.

Por fim, conclui-se que a viabilidade financeira do empreendimento é praticável, uma vez que o retorno é dentro do esperado. O projeto, caso venha ser implantado, servirá de incentivo às práticas de sustentabilidade no setor público, além de estudo prático nas diferentes disciplinas envolvidas.

## REFERÊNCIAS

ALDO (2021). **Gerador de Energia Fotovoltaico com potência de 51,2 kWp**. Disponível em: <http://www.aldo.com.br/Produto/?c=49142&d=gerador-de-energia-sma-laje-aldo-solar-GEF>. Acessado em: 20 de maio de 2021.

ANEEL (2021). **Reajuste de Tarifas de Energia Elétrica Grupo B**. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Brasil, 2021.

BANDEIRA DA FONTOURA, F. B.; RABUSKE, R.; FRIEDRICH, L. R. (2018). **Análise da viabilidade para implantação de energia fotovoltaica com utilização para sombreamento de estacionamento**. Estudos do CEPE, Santa Cruz do Sul, p. 36-48, set. 2018. ISSN 1982-6729. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/cepe/article/view/9424>>. Acesso em: 19 maio 2021. doi:<https://doi.org/10.17058/cepe.v0i0.9424>.

BYD (2020). **Datasheet: BYD MIK-36-SERIES-5BB 390W-410W**. BYD ENERGY DO BRASIL ([www.byd.ind.br](http://www.byd.ind.br))

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. (2010). **Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica**. Revista Controle & Automação, v. 21, n. 2, p. 159-171.

GOOGLE EARTH (2019). <http://earth.google.com>. Acessado em nov. 2019.

MORAIS, F. H. B. de L. (2017). **Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico de 5,2 KwP conectado à rede instalado na UECE**. 97f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará.

NASCIMENTO L. R.; RÜTHER, R. (2014). **A Avaliação de Longo Prazo de um Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação Urbana e Conectado à Rede Elétrica Pública**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 5, n. 1, p. 73-81.

PEROZA, J.; RAMPINELLI, G. A. (2018). **Análise de desempenho e atuação de diodos de bypass em um módulo fotovoltaico comercial**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. 17 a 20 de abril de 2018. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil.

PV\*SOL premium (2019). **Valentin Software PV\*SOL premium 2019(R10)**. (<https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>)

RAUSCHMAYER, H. (2019). **Manual de energia solar**. Solarize Treinamentos profissionais LTDA.

SOLARIZE (2019). **O software fotovoltaico PV\*SOL**. Disponível em: <<https://www.solarize.com.br/software-pv-sol>>. Acessado em: 29 de setembro 2019.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. (2015). **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 2ª Edição, Erica, São Paulo.

ZILLES, R., *et al.* (2012). **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos. 208p. ISBN: 9788579750526

## INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS DE ENERGIA COM RESTABELECIMENTO OTIMIZADO PARA O AGRONEGÓCIO

*Data de aceite: 01/07/2021*

### **Eloi Rufato Junior**

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica  
COPEL - Departamento de Energia Eólica.

### **Bruno Dias Camargo**

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica

### **Elison de Souza Moreira**

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica

### **Felipe de Souza Kalume**

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica

**RESUMO:** O presente trabalho refere-se à apresentação das alternativas de matrizes e soluções energéticas para o agronegócio no estado do Paraná, bem como as tecnologias que participam dos processos de captação, gerenciamento e distribuição de energia. O Brasil é um dos maiores produtores agropecuários do mundo e ainda não possui ampla implementação de tecnologias para a integração e reconfiguração de fontes independentes de energia voltadas para o agronegócio e propriedades rurais, o que a longo prazo reduziria custos para as concessionárias

de energia elétrica e usuário e aumentariam a qualidade do fornecimento de energia. A metodologia de pesquisa utilizada é descritiva, utilizando-se de casos já existentes ao redor do mundo, as relacionando com o agronegócio do Paraná, e as tecnologias disponíveis e acessíveis do mercado, bem como seus respectivos usos e funcionamentos e a também a criação de um estudo de caso utilizando o Paraná como cenário e 3 propriedades simuladas. O projeto criado como estudo de caso utiliza as melhores opções de fontes alternativas para a geração de energia no agronegócio e utiliza tecnologias que já foram utilizadas em projetos pilotos da COPEL para controle e restabelecimento da energia. O fluxo de potência e os cenários de reconfiguração das propriedades do estudo de caso são discutidos e também é apresentada análise da viabilidade técnico econômica do projeto.. Foram empregados dados da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Secretaria de Agricultura e Abastecimento (SEAB) para verificação da relação entre Agronegócio e Energia Elétrica. As alternativas apresentadas ao longo do trabalho mostram a capacidade da autonomia das propriedades se utilizando dos seus próprios recursos disponíveis e a viabilidade dessa implementação. A junção dos potenciais energéticos e as redes inteligentes mostram um cenário promissor no fornecimento de energia elétrica de qualidade, redução de custos para todos os envolvidos e de sustentabilidade ambiental, o que apresenta um grande estímulo ao investimento na implementação de microrredes e geração distribuída no estado do

Paraná.

**PALAVRAS - CHAVE:** Redes Inteligentes. Reconfiguração Automática. Fontes Renováveis. Agronegócio.

**ABSTRACT:** This work refers to alternatives of different sources and energetic solutions for agribusiness in the state of Paraná, as well as the technologies that participate in the processes of development, management and distribution of energy. Brazil is one of the largest agricultural producers in the world and still does not have a wide implementation of technologies for the integration and reconfiguration of independent energy sources aimed at agribusiness and rural properties, which in the long run would reduce costs for the electricity concessionaires and user and increase the quality of the power supply. The research methodology used is descriptive, using cases that already exist around the world, relating them to the agribusiness of Paraná, and the available and accessible technologies of the market, as well as their respective uses and functions and also the creation of a case study using Paraná as a scenario and 3 simulated properties. The project created as a case study uses the best options of alternative sources for energy generation in agribusiness and uses technologies that have already been used in COPEL's pilot projects to control and restore energy. The power flow and the reconfiguration scenarios of the case study properties are discussed and an analysis of the technical and economic feasibility of the project is also presented. Data from Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), National Electricity Agency (ANEEL) and Secretaria de Agricultura e Abastecimento (SEAB) were used to verify the relationship between Agribusiness and Electric Energy. The alternatives presented throughout the work show the capacity of the properties' autonomy using their own available resources and the feasibility of this implementation. The combination of energy potentials and smart grids shows a promising scenario in the supply of quality electricity, cost reduction for all involved and environmental sustainability, which presents a great incentive to invest in the implementation of micro networks and distributed generation in the state of Paraná.

**KEYWORDS:** Smart Grids. Automatic reconfiguration. Renewable sources. Agribusiness.

## 1 | INTRODUÇÃO

A reconfiguração automática é uma das tecnologias mais atrativas e relevantes para concessionárias de energia elétrica, justamente por trazer independência para a rede em alguns casos de perda de fornecimento e maior aproveitamento dos recursos já utilizados, resultando na diminuição da necessidade de construção de novas infraestruturas e/ou substituição de equipamentos já existentes nas redes de distribuição, transporte e armazenamento, colocando todo o investimento somente na nova tecnologia a ser estudada e implementada. Quando o sistema está operando, a essência recai no aumento de sua eficiência e na diminuição de custos operacionais, fazendo o sistema operar no estado de mínimas perdas que consiste basicamente na melhor distribuição do fluxo de potência, tendo impacto direto na vida útil dos equipamentos e no perfil de tensão dos circuitos de alimentação.

Existem várias tecnologias relacionadas a redes inteligentes, mas geralmente só

são eficientes apenas para os problemas específicos aos quais foram desenvolvidos e dentro deste contexto é importante o melhor entendimento das ferramentas disponíveis que podem ser implementadas. O objetivo deste estudo é discorrer sobre a criação de pequenas zonas descentralizadas de geração independente de energia alternativa renovável que funcionem como ilhas, e com o potencial de sustentar-se autonomamente em relação ao fornecimento primário de energia, formando microrredes e, de acordo com o BEN de 2019 (dados referentes ao ano de 2018), as energias renováveis correspondem a 45,3% da Oferta Interna de Energia e 83,3% da matriz elétrica nacional.

As propriedades agrícolas apresentam alto potencial energético natural renovável, e ao mesmo tempo baixo aproveitamento deste recurso. No mundo a contribuição da biomassa para o suprimento de energia é de 10 a 14%, enquanto no Brasil 8,5% da matriz elétrica brasileira é composta por biomassa, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018). Em complemento, é possível a escolha da utilização de outras fontes de energia, como a fotovoltaica (0,5% da Matriz Elétrica Brasileira em 2018), cuja geração elétrica cresceu em 316,1% do ano de 2017 para o ano de 2018 e a eólica (7,6% da Matriz Elétrica Brasileira em 2018) que teve sua geração aumentada em quase quatro vezes em menos de cinco anos (de 12.210GWh em 2012 para 48.475GWh em 2018), segundo os dados do BEN, fornecidos pela EPE.

Essa produção autônoma é tão somente uma alternativa, pois seu funcionamento se dá de maneira complementar ao fornecimento da concessionária de energia, fazendo assim necessário o uso de uma ferramenta de integração das fontes de energias renováveis alternativas às já fornecidas por padrão. O método a ser utilizado nesse contexto são as redes inteligentes, também conhecidas como Smart Grids, que, segundo Farhangi (2010), ocorrem como sendo a convergência de tecnologia de informação e comunicação com a engenharia de sistemas de potência, tendo em vista, essencialmente, prover uma total visibilidade e amplo controle sobre ativos e serviços, autocorreção e resiliência contra anomalias do sistema e ser capaz de se auto configurar e se adaptar às transações de energia em todo o conjunto.

## 2 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho realizado envolve inicialmente um levantamento bibliográfico, a partir de materiais já elaborados, como livros e artigos, referente aos assuntos de fontes alternativas de energia e redes inteligentes, mantendo o foco para as zonas rurais. Para a etapa de estudo de caso e viabilidade foi realizada a análise de uma possível propriedade onde tem-se interesse de implementar o modelo, e realizado o levantamento dos dados sobre potencial energético, características da rede elétrica do local e possíveis vizinhos para integração, assim como análise dos custos para implementação do projeto. Para a construção do protótipo foram analisados os modelos já existentes no mercado, utilizados

pelas concessionárias de energia, como, por exemplo, o Intellirupter da S&C e o Self Healing da Cooper, e a partir disso foi confeccionado o modelo para utilização na integração das fontes alternativas de energia da comunidade agrícola em estudo e reconfiguração automática da rede.

## 2.1 Fontes Alternativas de Energia

Segundo Tiepolo (2014), historicamente o Estado do Paraná tem sido um dos maiores produtores de energia elétrica do país, quase em toda a sua totalidade através de hidrelétricas. Entretanto, o aproveitamento desta fonte no estado, assim como no Brasil, está em declínio devido ao esgotamento do potencial hídrico e, também, devido à pressão da sociedade quanto aos impactos ambientais, sociais e econômicos. A geração de energia eólica, biomassa e fotovoltaica tem sido pesquisada no estado para superar essas limitações. A regulamentação criada em 2012, e sua aprimoração em 2015 realizada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), tornou mais acessível a geração distribuída para um número maior de consumidores, possibilitando a conexão de geradores de até 5 MW, oriundos de fontes renováveis e cogeração qualificada, na rede de distribuição (Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética, 2018).

### 2.1.1 Energia Hidrelétrica

A geração de energia hidrelétrica consiste inicialmente no aproveitamento da energia potencial fornecida pela água, a partir da vazão de rios e lagos ou ainda reservatórios, para produção de energia mecânica que será convertida, por meio de geradores, em energia elétrica (REIS, 2011). Segundo a ANEEL, em 2002, a energia hidrelétrica era apresentada como a principal fonte geradora de energia elétrica mundial, representando cerca de 20% de toda geração. No Brasil, esta forma de energia representou 66,6% da matriz elétrica nacional em 2018 (BEN, 2019).

As usinas hidrelétricas são classificadas a partir de suas características de utilização da água para geração de energia e sua potência gerada. Essa classificação se dá na seguinte forma (REIS, 2011): Micro centrais -  $P \leq 100$  kW; Mini centrais -  $100 < P \leq 1000$  kW; Pequenas centrais -  $1 < P \leq 30$  MW; Médias centrais -  $10 < P \leq 100$  MW; Grandes centrais -  $P \geq 100$  MW.

Para a utilização de reservatórios ou tanques (presentes em muitas propriedades rurais), como acumuladores de água para geração, as instalações devem receber algumas mudanças e adições dos pontos de captação de água. Uma microcentral hidrelétrica, de modo geral, possui a seguinte estrutura (NOGUEIRA, 2004):

- Barragem vertedoura - utilizada para armazenar a energia potencial das águas;
- Tomada de água - trecho que capta a água da barragem para a geração de energia elétrica;

- Canal de adução - caminho que conduz a água até a turbina geradora;
- Câmara de carga - dispositivo que realiza a transição entre o canal de adução e o conduto forçado;
- Conduto forçado - trecho que garante maior queda e energia potencial necessária para a geração;
- Casa de máquinas - onde as turbinas e equipamentos geradores são abrigados;
- Canal de fuga - trecho que devolve a água utilizada pelas turbinas ao curso do rio.

A potência máxima, em kW, fornecida pode ser calculada com a equação (I) (NOGUEIRA, 2004).

$$P = \gamma * g * Q * H * \eta * P / 1000 \quad (I)$$

Onde  $\gamma$  é a massa específica da água,  $g$  é a constante de aceleração gravitacional ( $\sim 9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $Q$  é a vazão disponível do curso d'água, em  $\text{m}^3 / \text{s}$ ,  $H$  é a queda líquida, em m e  $\eta$  é o rendimento do conjunto turbina-gerador.

### 2.1.2 Biomassa e Biogás

O conceito compreende todas as matérias orgânicas utilizadas como fontes de energia. Resíduos agrícolas, madeira e plantas – como a cana de açúcar, o eucalipto e a beterraba – são exemplos de biomassa. Outra forma de aproveitamento da biomassa é o biogás, sendo este uma fonte barata e abundante de energia, podendo ser obtido através de resíduos agrícolas, ou até excrementos animais e humanos. A formação do biogás acontece durante a decomposição da matéria viva, onde são lançados na atmosfera gases e calor.

Junto à energia hidrelétrica, a energia de biomassa é responsável pelo suprimento da maior parte de energia consumida no Brasil. O que traz uma situação privilegiada ao Brasil, no que se refere a suas fontes primárias de oferta energética. Dados da COPEL (Companhia Paranaense De Energia Elétrica), 30% das necessidades de energia no país são supridas por biomassa, usando lenha para queima direta em padarias e cerâmicas, carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustíveis alternativos em fábricas de cimento e queima de carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico no Sul.

Nesse contexto se torna vantajoso para o Paraná investir no aproveitamento de biomassa e/ou biogás para a produção de energia elétrica, pois possui uma grande área de produção agrícola, dados da SEAB (Secretaria de Agricultura e Abastecimento) mostram que comparado ao resto do Brasil, o Paraná produziu, no ano de 2016, 17,77% da aveia (em grão), 17,69% da batata-inglesa, 30,99% do centeio, 53,68% da cevada, 22,78% do feijão, 20,95% do Fumo, 17,67% da Mandioca, 20,97% do milho, 17,57% da soja, 51,02% do Trigo entre outros produtos, além da pecuária. Esses dados dão uma noção do potencial

de geração de energia com biomassa e biogás a partir desses insumos.

### 2.1.3 Energia Solar Fotovoltaica

Os painéis solares transformam a energia solar em energia elétrica, fornecendo tensão em corrente contínua. Além da geração, é necessário realizar a conversão e a disponibilização da energia, para isso é utilizado o inversor, o qual é o componente responsável pela conversão da energia gerada pelo sistema fotovoltaico de corrente contínua para corrente alternada, gerando a tensão elétrica na frequência da rede local, com maior teor de harmônicos e onda da forma senoidal. Os inversores de última geração são equipados com circuitos microprocessados com o intuito de otimizar a geração de energia elétrica com rápida atuação sobre a energia gerada pelos módulos solares (RÜTHER, 2004 apud GROTH, 2013).

Para a otimização e melhor aproveitamento da potência dos painéis solares, estes são associados em série ou em paralelo, de modo a atingir uma faixa de tensão mais elevada para a conversão da energia. Um grupo de painéis conectados em série são comumente denominados strings, que serão responsáveis pelo nível de tensão do conjunto conectado aos inversores, e a associação das strings em paralelo são denominados de arrays, que possibilita a soma das correntes de cada string associada, elevando a potência conectada aos inversores (Kasim, 2020).

Segundo Groth (2013), para complementar, são utilizados alguns componentes que proporcionam o funcionamento correto e seguro de um sistema fotovoltaico, entre eles estão: disjuntores e fusíveis (proteção contra corrente de sobrecarga e curto-circuito); Diodos de by-pass e de bloqueio (evita que uma célula com baixo rendimento interfira no desempenho das outras); aterramento e proteção contra descarga atmosférica; baterias (armazenam energia produzida, suportando o período de baixa geração); e, também, sistemas de monitoramento e identificação de falhas.

## 2.2 Redes Inteligentes

Segundo Huayllas (2015), uma microrrede pode ser composta por uma ou mais fontes associadas a uma carga, podendo operar de forma independente ou ligada à rede de distribuição principal. Para o consumidor, uma microrrede tem o objetivo de reforçar a confiabilidade, aumentar a eficiência e melhorar a qualidade da tensão. A estrutura de uma microrrede pode variar de acordo com a carga e com as fontes de energia disponíveis.

Os problemas que a construção de uma microrrede visa resolver estão relacionados a interrupções na rede de distribuição que geram custos adicionais, implementação de novas tecnologias e preocupações sociais emergentes que estão causando ruptura na indústria e à infraestrutura existente que não é projetada para mudanças rápidas. Em relação às interrupções na rede de distribuição, são levados em consideração: a satisfação do cliente, o tempo destrutivo, desastres naturais e desafios geográficos (S&C, 2018).

### 2.2.1 Conceito de microrrede

A S&C (2018) conceitua a microrrede como um grupo de cargas interconectadas e recursos de energia distribuídos dentro de limites elétricos definidos, que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede. Uma microrrede pode se conectar e desconectar da rede para permitir que ela opere em uma rede conectada ou em modo de ilha, o que é mostrado esquematicamente na Erro: Origem da referência não encontrada.

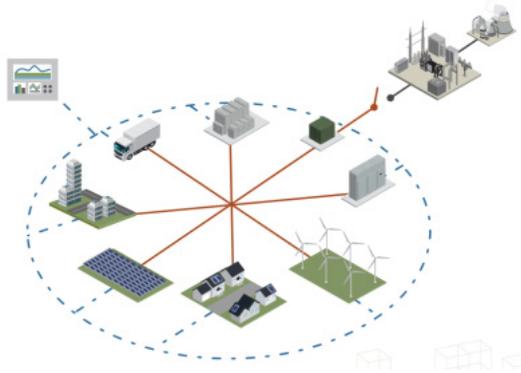


Figura 1 - Modo de operação de uma microrrede.

Fonte: S&C(2018).

Huayllas (2015) define o modo de operação conectado à rede como uma forma de oferecer suportes reativos a rede, controlando a tensão local e injetando potência ativa na mesma. O modo de ilha é dividido em dois modelos, o planejado, o qual resulta na geração de pequenos transitórios de tensão e, apesar de alguns possíveis problemas de desequilíbrio entre carga e geração, é um modo atrativo para os consumidores no ponto de vista econômico, e o forçado, que ocorre devido à presença de falhas na rede de distribuição pela presença de perturbações.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas soluções que podem ser tomadas relacionadas ao fornecimento de energia, todas elas acompanhadas com os seus pontos positivos e negativos.

Solução	Prós	Contras
<b>Não Fazer Nada</b>	Sem nenhum custo hoje	Torna-se caro a longo prazo pois problemas crescem e ainda causam interrupções
<b>Reprojetar A Infraestrutura Grandes Capacitores Usinas De Pico</b>	Obter exatamente o que você quer e o que você precisa Amortece ou equilibra picos de carga	Extremamente caro e demorado Caro e fornece apenas alguns segundos de energia de back-up
<b>Microrredes</b>	Pequenas, precisam ligar somente quando a carga excede a geração primária ou quando um nível de importação seja atingido Solução escalável, podem ser dimensionadas para diversas necessidades, reage automaticamente quando há um problema e pode oferecer várias vantagens econômicas.	Caro, não pode ser dimensionado ao longo do tempo para atender as necessidades de mudança, além de contribuir com emissão de carbono Caro, sistemas complexos podem exigir mais tempo para projetar e instalar do que outras soluções

Tabela 1 - Prós e Contras para diferentes soluções para fornecimento de energia

Fonte: Aatoria Própria (2021).

### 2.2.2 Estrutura de Projeto para uma Microrrede

Para o estabelecimento de uma microrrede são necessários alguns procedimentos. O planejamento e levantamento de dados energéticos da propriedade são fundamentais. Segundo a S&C (2018) a execução de um projeto de implementação de uma microrrede segue 7 passos essenciais:

- 1. Avaliação de viabilidade:** Cada microrrede possui característica de geração e operação diferente, desta maneira o estudo do impacto financeiro é necessário para cada projeto;
- 2. Projeto do sistema:** Totalmente atrelada a avaliação de viabilidade, esta etapa de projeto visa a escolha das tecnologias que serão implementadas, tipos, tamanhos, localização e métodos de integração;
- 3. Planejamento financeiro:** Nesta etapa define-se as formas de investimento, os benefícios, o retorno para quem implementou o projeto, o capital necessário para a operação do sistema e se haverá investimento de terceiros;
- 4. Projeto de engenharia:** Para a conclusão com êxito de um projeto deste porte se faz necessário um certo nível de experiência com microrredes e familiaridade com sistemas de distribuição;
- 5. Construção:** A instalação do sistema exige uma prévia experiência com trabalho em ambientes eletrificados. Na aquisição dos equipamentos é importante orçar os custos operacionais, ciclo de vida e custo de implantação;
- 6. Comissionamento do Sistema:** Nesta etapa se realiza os testes de funcionamento da rede, verificação de geração e inspeção do local;
- 7. Operação e otimização:** Além da manutenção regular, para manter uma microrrede operando com desempenho de alto nível requer a construção de controladores especificamente para microrredes. A utilização destes equipamentos pode maximizar a eficiência do sistema, utilizando previsões de tempo, análise de mercado e venda de energia e dados de desempenho do sistema.

Dentro deste contexto, a estrutura das micro grids se dividem em 5 grandes grupos:

1. *Ativos Existentes*: Compreende todas as cargas existentes, fontes geradoras e distribuição de serviço público;
2. *Hardware*: Aqui situa-se todos os tipos de tecnologias empregadas para a operação da microrrede. Estas tecnologias, como já citado, serão escolhidas a partir dos critérios de operação desejados.
3. *Serviços de integração*: Segundo Fang et al. (2012), o sistema de infraestrutura inteligente integra informação e comunicação. Uma microrrede não funciona sem uma integração estável e eficiente, sendo essencial para garantir que *hardware*, *software* e controles reajam de forma rápida e inteligente a oscilações do sistema;
4. *Controles*: Os controladores são responsáveis pela coordenação dos componentes do sistema. Os controladores operam em três níveis, em nível de ciclo onde se detecta e comunica-se eventos de forma instantânea na microrrede, em nível de segundos onde ocorre a tomada de decisão a partir dos dados coletados e por fim em nível de horas, onde é permitido o operador da microrrede realizar mudanças nos critérios de operação;
5. *Serviços de implantação*: São o conjunto de serviços e ações desde a implementação da rede até sua operação em longo prazo. Após a construção do sistema é necessário tomar medidas para garantir a operação contínua de toda a rede.

### 2.2.3 Reconfiguração Automática

O termo reconfiguração é definido por Pfitscher (2013) como a mudança na topologia da rede, através de fechamento e abertura de chaves, com o objetivo de reduzir perdas, melhorar níveis de tensão, balancear cargas e melhorar a qualidade do serviço. Segundo Pfitscher (2013), a reconfiguração de uma rede pode acontecer em três situações: quando há a necessidade de atender consumidores que estão sem energia por alguma falha na distribuição, quando há a necessidade de manutenção de alguma região ou quando visa a melhora do desempenho da rede.

De acordo com a S&C (2019) as tecnologias de reconfiguração automática também apresentam baixos índices de DEC, FEC e FIC que são indicadores que a ANEEL (2012) utiliza para avaliar a qualidade relacionada ao fornecimento de energia elétrica, e são descritos como:

- DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora: Intervalo de tempo que, em média, em cada unidade consumidora considerada ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
- FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora: Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

- FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora: Número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

## 2.3 Algumas Conformidades

A Copel (2019) disponibiliza as normas técnicas (NTC) para o acesso de geração distribuída em seu sistema elétrico, como as seguintes:

**NTC 905100 - Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel (com comercialização de energia):** fornece os requisitos para acesso de geradores de energia elétrica ao sistema elétrico de distribuição da Copel em Média Tensão - MT (13,8 e 34,5 kV) e em Alta Tensão - AT (69 e 138 kV), excluindo as Demais Instalações de Transmissão – DIT pertencentes às transmissoras e os casos de adesão ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (Micro e Minigeradores).

**NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel (com compensação de energia):** fornece os requisitos para acesso de geradores de energia conectados através de unidades consumidoras optantes pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica, instituído pela Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012

**NTC 903105 - Geração Própria - Operação em Paralelismo Momentâneo:** A unidade consumidora poderá possuir sistema de geração própria, destinado a operar nos casos emergenciais ou a critério do consumidor, com a possibilidade de operação em paralelismo momentâneo com o sistema de fornecimento da Copel.

**NTC 903107 - Geração Própria - Operação Isolada em Emergência:** A unidade consumidora poderá possuir sistema de geração própria, destinado a operar nos casos emergenciais ou a critério do consumidor, sem a possibilidade de operação em paralelo com o sistema de fornecimento da Copel.

## 3 | ESTUDO DE CASO

Nesta sessão é apresentado um projeto conceitual de uma microrrede para fins de análise. O projeto apresenta a integração das fontes estudadas ao decorrer do trabalho (microgeração hidrelétrica, fotovoltaica e biomassa) e aborda a geração de energia em três propriedades com características encontradas no estado do Paraná. A primeira propriedade trata-se de uma granja, com grandes galpões aviários que permitem a instalação de painéis solares no telhado do mesmo, a segunda é voltada para criação de porcos, com potenciais energéticos de biomassa, e a terceira é focada em produção agrícola, possui um riacho utilizado para irrigação das plantações, sendo aproveitado para geração hidrelétrica.

### 3.1 Propriedade com Geração Fotovoltaica

Em propriedades voltadas para criação agrícola, poucas horas sem energia elétrica já podem acarretar em grandes perdas, como em propriedade em Adamantina (G1, 2020).

Estas propriedades possuem grandes galpões que podem ser utilizados para a instalação de painéis fotovoltaicos atrelados a um banco de baterias, o que resolveria os problemas com queda de energia e não necessitaria de geradores poluentes, como os a diesel.

### 3.1.1 Consumo da Propriedade

A propriedade em questão tem equipamentos que possuem cargas totalizando o valor de 17.201,28 kWh por mês. Utilizando a equação (II) é possível calcular o custo mensal (C\$) com a energia elétrica para a propriedade, levando em consideração as tarifas convencionais para propriedades rurais disponibilizadas pela Copel (2020) de 0,31537 R\$/kWh para TE e 0,30207 R\$/kWh para TUSD, ambas com impostos inclusos.

$$C\$ = C * (TE + TUSD) \quad (II)$$

Com o cálculo é obtido um custo mensal de R\$ 10620,76.

### 3.1.2 Geração Fotovoltaica

Para a propriedade, é considerado um conjunto de painéis numa potência nominal de 488,4 kWp. A potência de pico dos painéis solares (Wp), são mensurados a uma exposição a radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>. Para o projeto, serão usados painéis solares da empresa paranaense Balfar Solar. Para atingir a potência nominal desejada é utilizada a equação (III).

$$P = P_{un} * Qtde \quad (III)$$

Sendo P a potência nominal desejada, sendo considerada a de 488,4 kWp, Pun a potência de cada painel, no projeto são utilizados painéis de 370Wp. Assim, são necessários 1320 painéis para totalizar 488,4 kWp, satisfazendo o valor desejado. Os painéis são instalados em um modelo chamado de arranjo fotovoltaico. Para o cálculo da área ocupada pelo arranjo é utilizada a equação (IV).

$$A_{tot} = A_{un} * Qtde \quad (IV)$$

Sendo Atot a área total ocupada pelos painéis, a área de cada painel individual e Qtde a quantidade de painéis. Segundo dados da Balfar Solar (2019), os painéis solares possuem uma área de aproximadamente 1,94 m<sup>2</sup> (0,992 x 1,956 m), assim a área total dos 1320 painéis ocupará uma área com cerca de 2560,8 m<sup>2</sup>, instalados no telhado dos galpões presentes na propriedade. A instalação é capaz de fornecer 488,4 kW por hora, com irradiação média mínima de 1000 W/m<sup>2</sup>, segundo dados do Atlas Solar Paraná (2017) a irradiação anual média para o estado está entre 4 a 5,5 horas por dia.

Utilizando a equação (V) é possível calcular o valor gerado médio de energia por dia.

$$E = t_{med} * P_{hr} * I_{rmed} \quad (V)$$

Considerando  $t_{med}$  o tempo médio de 5h diárias,  $P_{hr}$  a potência gerada por hora e  $I_{rmed}$  a irradiação média mínima, é possível concluir que a instalação é capaz de fornecer 2442 kWh de energia por dia.

### 3.1.3 Geração Fotovoltaica

No cenário nacional, possuem vários fabricantes de transformadores e inversores, que possibilitam a transmissão de energia nas redes de distribuições locais de média tensão e nas linhas de longas distâncias de alta tensão. A WEG disponibiliza soluções para energia solar, como o inversor SIW500H – ST100 M1, modelo de 100 kW de saída, que é utilizado no projeto.

O inversor WEG (201-?) modelo SIW500H – ST100 M1 possui 20 entradas, com tensões que variam de 200 V a 1000 V, para uma saída de 380 VCA 60 Hz, que é a utilizada neste projeto, e uma corrente de 26 A por MPPT. O rastreamento do MPPT é feito em duas entradas paralelas.

Com estas informações, é possível mensurar o arranjo dos painéis em *strings* a serem conectadas e monitoradas pelo inversor, que possui monitoramento e diagnóstico de falhas para cada *string* instalado. Da Silva (2015) relata que como a instalação de *strings* e *arrays* devem ser elaboradas para a conexão em inversores de carga.

Para calcular a quantidade de painéis por entrada é utilizada a equação (III), substituindo os valores de potência pelos respectivos valores de tensão, assim, considera-se P o valor de tensão na entrada do inversor, para o caso do estudo de 1000 VCC, Pun a tensão de operação em potência máxima de cada painel de 40,7 VCC conforme Balfar Solar (2019). Com isso, obtém-se o valor de 24,6 painéis, que é arredondado para 25, totalizando-se 976,8 VCC na entrada do inversor.

Cada string possui uma potência total de 8.880 W, que é dada pela multiplicação direta da quantidade de painéis pela potência de cada um, conforme a equação (VI).

$$P_{string} = P_{un} * Qtde \quad (VI)$$

Como os painéis estão em série, cada string fornece uma corrente máxima de 9,11 A. Dessa forma, instalando 1 string por entrada, e utilizando 6 entradas é possível respeitar a corrente máxima do equipamento de 26 A por MPPT.

Com a utilização de 11 entradas, conectando uma string por entrada, é possível atingir a potência de 97,68 kW por inversor (11 strings, 24 painéis por string, 370W por painel). Assim, serão instalados 5 inversores SIW500H - ST100 M1 nesta configuração, totalizando 488,4kW instalados. Considerando a eficiência de 98%, obtém-se um valor de 2393,1 kWh de geração diária, em relação aos 2442 kWh diários.

Para o armazenamento de energia, a WEG possui uma linha completa de nobreaks em seu portfólio, dentre os produtos, destaca-se o modelo Enterprise de 380 V. O

equipamento possui uma saída trifásica 380 VAC 60 Hz, o mesmo valor de sua entrada, e não coincidentemente, o mesmo valor de trabalho do inversor dos painéis, o que possibilita o trabalho integrado destes equipamentos sem a utilização de transformadores no conjunto. A eficiência máxima do equipamento é de 90%, o que nos indica que para a potência instalada de 160 kW, é possível utilizar 144 kW, como calculado na equação (VII).

$$160kW * 0,9 = 144kW \quad (VII)$$

De acordo com WEG (2020), das especificações de baterias para equipamentos 380V, para a operação do equipamento devem ser instaladas 62 baterias. A partir do valor de consumo de 17.201,28 kWh, tem-se uma média de consumo diária de 573,38 kWh ou ainda 23,89 kW médio por hora. Considerando a utilização média de potência da propriedade por hora, o nobreak instalado teria a autonomia de 6,02 horas, como calculado na equação (VIII).

$$160 kW / 23,89 kW = 6,02 \quad (VIII)$$

### 3.1.4 Distribuição e Integração com a Rede Local

O transformador CST ONAN da fabricante WEG, de 500 kVA, é ideal para esta aplicação, com tensão de 0,38 kV 60 Hz na entrada/saída de baixa e 13,8 kV na entrada/saída de alta, é instalado em postes ou com suporte com rodas.

Os equipamentos principais, como geradores, transformadores e barramentos, formam zonas primárias de proteção, que devem possuir dispositivos de segurança na entrada e na saída da energia elétrica de cada zona. Os dispositivos geradores comumente possuem o seu próprio sistema de proteção, já dimensionado para a sua operação. Na configuração proposta, a proteção é feita em diferentes níveis de tensão, no primário do transformador é conectado uma rede de baixa tensão, com diferença de potencial de 380V, no secundário do transformador é conectado uma rede de média tensão, com diferença de potencial de 13,8kV.

Para a proteção de circuitos elétricos em baixa tensão, é comum a aplicação de disjuntores de caixa moldada, e a fabricante WEG disponibiliza uma linha completa de soluções, denominada Disjuntores em Caixa Moldada DW, que disponibiliza, em alguns modelos com correntes mais elevadas, proteção eletrônica e ajustes para correntes de trabalho e falha (WEG, 2021).

A configuração da conexão em baixa tensão é padronizada pela concessionária, e deve ser utilizado o método estrela aterrado (Copel, 2018). A corrente trifásica do circuito pode ser calculada com a equação (IX).

$$I = \frac{Pot}{V * \sqrt{3}} \quad (IX)$$

Com a instalação de potência total de 488,4 kW e tensão de linha (diferença de potencial entre duas fases) de 380V, a corrente de linha total calculada é de 742,05 A. A configuração estrela aterrada disponibiliza um nível de tensão de fase (diferença de potencial entre fase e neutro) igual a 220V (segundo equação (X)) e corrente de neutro máxima igual a corrente de linha máxima. Assim, o disjuntor comercial para esta aplicação é o de corrente nominal ( $I_n$ ) igual a 800A modelo DWB800S800-4DA, com capacidade de interrupção de 50kA, atendendo às normas da concessionária (Copel, 2018).

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (X)$$

De acordo com a WEG, para a proteção térmica (sobre carga) em circuitos de distribuição, a corrente de ajuste é a própria  $I_n$ , ou seja 800A, e para a proteção magnética (curto circuitos) a corrente de ajuste é na faixa de cinco vezes a  $I_n$ , 4000 A. O dispositivo possui ajuste para proteção de condutor neutro, que pode ser feito em 100% do valor da corrente de fase, 50% ou sem proteção, que para este projeto, a proteção deve estar no nível de 100% (WEG, 2020). Os cabos elétricos para a transmissão de energia devem suportar a corrente nominal dos dispositivos de segurança que é de 800A, e nesta faixa de corrente, o fabricante General Cable disponibiliza o modelo ENERGY RV/XV 0,6/1kV E, condutor singelo com bitola de 400mm<sup>2</sup>, que suporta uma corrente máxima de 823 A, e deve ser instalado 1 condutor por fase (General Cable, 2020).

Para a proteção em média tensão, com nível de 13,8 kV, utiliza-se o interruptor de falhas *IntelliRupter* da S&C. O dispositivo possui, além de monitoramento de falhas e religamento automático, opções para configuração e monitoramento remoto, o que amplia a faixa de controle da rede, com modelos comerciais para nível de tensão até 15,5 kV e segurança até 630 amperes.

A conexão em média tensão, de acordo com a concessionária de energia, é realizada na configuração delta, com nível de tensão de linha de 13,8 kV (Copel, 2018). Para o cálculo da corrente de linha ( $I_L$ ), utiliza-se a equação (X), obtendo-se o valor de 20,33 A. Para esta configuração, a corrente de fase ( $I_f$ ) se dá pela equação (XI), ou seja, 11,80 A. Para a média tensão, a corrente de ajuste adotada é igual a 1,3 vezes a  $I_n$ , ou seja, 26,43 A para corrente de linha, e 15,34 A para corrente de neutro. Para esta faixa de corrente, pode-se utilizar o modelo cabo para média tensão FOREX 8,7/15 kV, sendo utilizado 1 cabo por fase, com bitola mínima de 25mm<sup>2</sup> e capacidade de corrente de 156 A (General Cable, 2021).

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (XI)$$

O diagrama unifilar do projeto de instalação é mostrado na Erro: Origem da referência não encontrada, onde os religadores da fonte fotovoltaica estão simbolizados como um único religador, como deverá ser o funcionamento dos mesmos em conjunto.

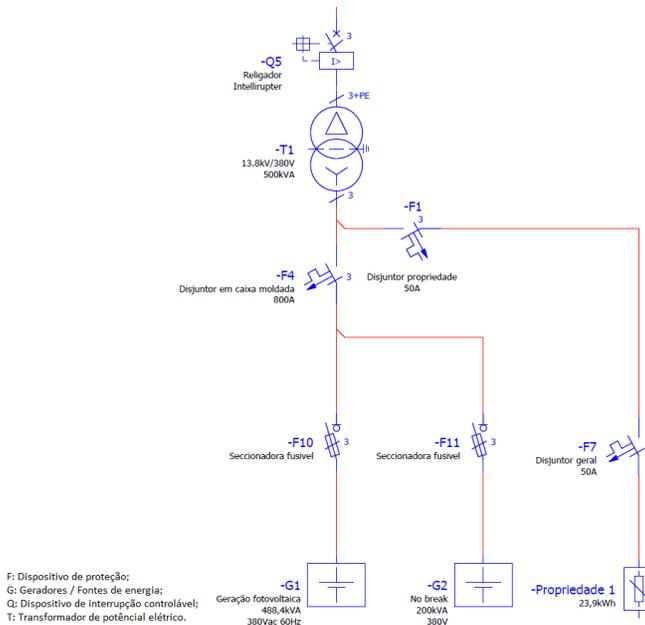


Figura 2 - Projeto de propriedade com Geração Fotovoltaica.

Fonte: Autoria Própria (2021).

## 3.2 Propriedade com Geração a Biomassa

Nesta propriedade, a biomassa provém das fezes de porcos, que são criados para consumo, e se não utilizada um grande potencial energético será desperdiçado. Para o projeto de geração, é considerado uma produção média de 2000 porcos a cada trimestre. Para a geração do biogás a partir das fezes de suínos, a propriedade deve possuir biodigestores, que armazenam as fezes até que o biogás seja gerado, a partir da digestão de bactérias (NUNES, 2017). Para geração, serão considerados a biomassa já transformada em biogás e filtrada, pois o manejo e técnicas empregadas para a transformação dos resíduos em energia consumível pelos geradores fogem do escopo deste trabalho..

### 3.2.1 Consumo da Propriedade

A propriedade tem um consumo total no valor de 14.172,32 kWh por mês. Utilizando a equação (II) é obtido o custo mensal com a energia elétrica para a propriedade de R\$ 8750,55, levando em consideração as tarifas convencionais para propriedades rurais disponibilizadas pela Copel (2020) de 0,31537 R\$/kWh para TE e 0,30207 R\$/kWh para TUSD, ambas com impostos inclusos.

### 3.2.2 Geração a Biomassa

Segundo Nunes (2017), porcos geram cerca de 0,1431 a 0,2400 m<sup>3</sup> de biogás ao dia, e foi adotado, para este trabalho, uma geração média de 0,2 m<sup>3</sup> ao dia, e com um total de 2500 porcos a propriedade é capaz de gerar 16,7 m<sup>3</sup>/h, seguindo os cálculos da equação (XII), que será filtrado para geração de energia.

$$0,2m^3\text{porciaporporco} * 2500\text{porcos}/24\text{h} = 20,83m^3/h \quad (\text{XII})$$

Para a utilização do biogás em geradores de energia, o combustível base deve ser filtrado e separado de agentes nocivos, porém, para o dimensionamento correto do sistema de filtragem do biogás, é necessário análise de amostras, e assim como em outros trabalhos acadêmicos, será adotado um biogás com um nível energético baixo, com 65% de metano em sua composição (NUNES, 2017).

Para biogás com 65% de concentração de metano, a ERBR (2020) disponibiliza biogeradores como, o modelo GMWM50, que consome 20m<sup>3</sup>/h, com uma geração máxima de 32 kWh em 24 horas. Considerando o tempo de manutenção mensal que o gerador necessita e o consumo da propriedade, foi utilizado um fator de utilização de 62,5%, com uma geração diária de 480 kWh/dia (Equação (XIII)) e uma produção mensal de até 14.400 kWh (Equação (XIV)).

$$32kW * 24h * 0,625 = 480kWh \quad (\text{XIII})$$

$$32kW * 24h * 30dias * 0,625 = 14.400kWh \quad (\text{XIV})$$

A propriedade tem um consumo mensal de 14.172,32 kWh e será gerado um total de 14.400 kWh, isso significa que sobrarão 227,68 kWh por mês. Além da utilização de geradores desenvolvidos para consumo de biogás, outra alternativa é a utilização de motores a combustão interna, como os a gasolina, convertidos para utilização a biogás conforme analisa Bruna Campos (2019), no trabalho citado é abordado um projeto de P&D na cidade de Entre Rios do Oeste no estado do Paraná, e financiado pela fornecedora de energia local COPEL.

### 3.2.3 Distribuição com a Rede Local

O modelo de gerador utilizado disponibiliza energia em sua saída em 380 VAC 60 Hz, trifásico, que pode facilmente ser utilizado pela propriedade e somente necessita de transformador para ligação à rede local. A fabricante nacional WEG também atende este ramo de potência, disponibilizando o menor transformador de seu portfólio, com uma potência de 45 kVA, com entrada/saída em baixa de 380 VAC 60 Hz, e entrada/saída 13,8 kV AC 60 Hz.

Assim como no projeto de geração da propriedade de energia solar, o transformador forma uma zona primária, necessitando um dispositivo de proteção na entrada e na saída

de energia elétrica. Para a proteção em baixa tensão será utilizado disjuntores em caixa moldada, e para a média tensão a ligação com a rede é feita a partir do *IntelliRupter*. A conexão em baixa tensão é feita em estrela aterrado, e em média tensão em delta.

Com a equação (IX), pode-se calcular o valor de corrente trifásica que é fornecido quando a geração está em potência máxima, de 32 kW com diferença de potencial de 380 V. A corrente de linha e de fase calculada é de 48,62 A. O valor comercial de disjuntor para esta faixa é de 50 A de corrente nominal ( $I_n$ ) com código DWB160N50-4DF, com capacidade de interrupção de até 36kA (WEG, 2021). Este modelo possui ajuste térmico (sobrecarga) na ordem de 50 A, e proteção magnética fixa (curto circuito), conforme critérios de curva de disparo disponíveis na norma NBR IEC 60947-2 (WEG, 2021). Os cabos indicados para a instalação de baixa tensão são do modelo ENERGY RV/XV 0,6/1kV E, um condutor por fase, com bitola 6mm<sup>2</sup>, com capacidade de até 54 A (General Cable, 2021).

A corrente trifásica em alta tensão pode ser calculada com a equação (IX), com potência máxima de 32 kW e nível de tensão de 13,8 kV, o valor obtido é de 1,34 A para corrente de linha, e de 0,77 A para corrente de neutro. O ajuste de corrente de falta deve ser feito com  $1,3 \times I_n$ , 1,74 A para corrente de linha e 1 A para corrente de neutro. Para esta faixa de corrente, pode-se utilizar o modelo cabo para média tensão FOREX 8,7/15 kV, sendo utilizado 1 cabo por fase, com bitola mínima de 25mm<sup>2</sup> e capacidade de corrente de 156 A (General Cable, 2021). O gerador utilizado deve possuir sistema de segurança próprio, com chave seccionadora, fusíveis ou disjuntores, conforme indicação do fabricante, o diagrama unifilar do projeto de instalação é mostrado na Erro: Origem da referência não encontrada.

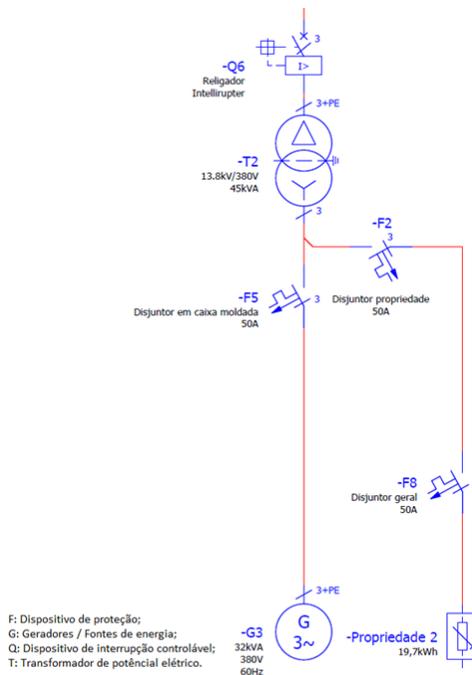


Figura 3 - Projeto de propriedade com geração a biomassa.

Fonte: Autoria Própria (2021).

### 3.3 Propriedade com Minigeração Hidrelétrica

A terceira propriedade conta com recursos naturais privilegiados, dentro da propriedade passa um córrego que já é utilizado para irrigação das lavouras. Este é aproveitado no estudo para a minigeração hidrelétrica, que já é utilizada em meio urbano e alguns fabricantes possuem soluções com esta finalidade.

#### 3.3.1 Consumo da Propriedade

A propriedade possui cargas que totalizam o consumo de 14.851,68 kWh por mês. Utilizando a equação (II) para cálculo do custo mensal com a energia, é obtido o valor de R\$ 9170,02, levando em consideração as tarifas convencionais para propriedades rurais disponibilizadas pela Copel (2020) de 0,31537 R\$/kWh para TE e 0,30207 R\$/kWh para TUSD, ambas com impostos inclusos.

#### 3.3.2 Minigeração Hidrelétrica

O conjunto instalado na propriedade possui uma queda de 10 metros com uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s pelo conduto forçado. Considerando um rendimento médio da turbina de 0,77, e do gerador elétrico de 0,95, aplicando a equação (I), obtém-se um valor de 430,122

kW do conjunto instalado.

Para auxiliar na escolha de turbinas de geração, a HISA, do Grupo WEG, disponibiliza um guia para seleção, disponibilizando 3 modelos básicos de turbinas, modelo Pelton, Francis e Kaplan. Cada modelo é adotado a um tipo de vertedouro, com pequenas vazões e grandes quedas, ou pequenas quedas e grandes vazões.

Utilizando o gráfico guia (HISA, 2018) para seleção de turbinas e das informações da propriedade (queda de 10 m com vazão de 6 m<sup>3</sup>/s), a turbina que mais se adequa ao projeto é o modelo Kaplan, com capacidade de geração de 500 kW, em conjunto com hidrogerador WEG GH10, de 500 kVA, fornecidos na tensão de 380V 60Hz (WEG, 2015), o que possibilita o aproveitamento total dos 430,122 kW disponíveis na planta de geração.

Gerando energia 6 horas diárias, entre os meses de outubro a março (151 dias em anos não bisextos), que possuem os maiores volumes de chuva para o estado (CLIMATE, [20-?]), de modo que a irrigação das lavouras não sejam afetadas, utilizando a equação (I) para cálculo de kWh, a propriedade gera 2.580,737 kWh/dia e 389.690,532 kWh/ano.

### 3.3.3 Distribuição e Integração com a Rede Local

Assim como mencionado nas seções anteriores, os transformadores constituem zonas primárias de proteção, que necessitam de dispositivos para segurança na entrada e na saída de energia elétrica. Para baixa tensão, será instalado disjuntor de caixa moldada, e em média tensão, religadores *IntelliRupter*. A conexão realizada em baixa tensão é na configuração estrela aterrada, e em média tensão delta.

Quando a fonte hidrelétrica estiver fornecendo a potência total de 430,122kW, com nível de tensão de linha igual a 380V, a corrente de linha e de neutro máxima da transmissão será de 653,50 A (calculado com a equação (IX)). Nesta faixa de tensão, o disjuntor comercial é o mesmo utilizado para proteção de baixa tensão na fonte geradora fotovoltaica, código DWB800S800-4DA, e os parâmetros para ajuste são os mesmos calculados. Os cabos de distribuição são do modelo ENERGY RV/XV 0,6/1kV E, sendo um condutor singelo com bitola de 400mm<sup>2</sup> por fase, que suporta uma corrente máxima de 823 A (General Cable, 2020).

A corrente de linha em média tensão, para a potência de 430,122kW e diferença de potencial em 13,8kV, é de 18,00 A, e a corrente de neutro é de 10,39 A (calculadas com a equação X). Para a corrente de ajuste de falta é de 1,3 x I<sub>n</sub>, sendo 23,39 A para corrente de linha e 13,51 A para corrente de neutro.

São indicados para a instalação em média tensão, cabos com bitola mínima de 25mm<sup>2</sup>, 1 condutor por fase, modelo FOREX 8,7/15 kV da General Cable, com capacidade máxima de 156A quando instalados em ar livre (General Cable, 2021).

O gerador de energia utilizado deve possuir seu próprio sistema de segurança, com chave seccionadora, fusíveis ou disjuntores, conforme indicação do fabricante, o diagrama

unifilar do projeto de instalação é mostrado na F, os religadores estão ilustrados em uma única peça, assim como deve ser o seu funcionamento interligado.

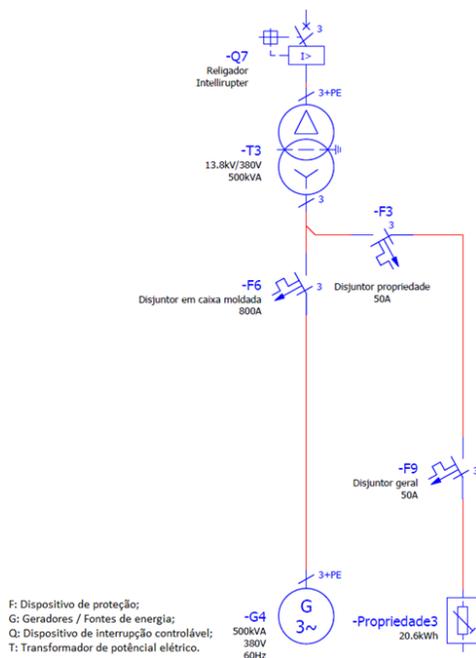


Figura 4 - Projeto de propriedade com geração hidrelétrica.

Fonte: Autoria Própria (2021).

### 3.4 Integração das Fontes e Gerenciamento da Microrrede

Os interruptores de falha com chaves seccionadoras com fusíveis integradas, *IntelliRupter*, utilizados para conexão das propriedades geradoras à rede, são essenciais para a integração e proteção das fontes de energia, além da instalação destes equipamentos em cada propriedade, é necessária instalação de mais dois religadores antes e depois da microrrede, o que possibilita o ilhamento e compartilhamento de carga entre as propriedades em momento de falhas na rede de distribuição local. Estes equipamentos realizam o seccionamento automático em caso de falhas e resets quando a falha é normalizada, de forma independente e com troca de informações entre eles. Mas, para um maior controle da rede e desligamento das propriedades em caso de manutenção, é interessante a instalação de equipamentos com supervisor, e que possibilitem o seccionamento remoto, para manutenção das fontes geradoras, ligação de novas fontes geradoras, etc. Para isto, cada propriedade está equipada com um módulo IntelliNode™ Interface Module do sistema IntelliTeam SG Automatic Restoration System da S&C.

De acordo com a S&C (20-?) o IntelliTeam SG Automatic Restoration System realiza

a supervisão e controle da rede e automaticamente configura o sistema de distribuição depois de uma falha e rapidamente recompõe o serviço para os segmentos que não foram afetados pela falha.

### 3.4.1 Fluxo de Potência para Cenários de Reconfiguração da Rede

Foi utilizado o software ETAP (2021) para a realização da simulação do fluxo de potência. No estudo foram considerados cinco cenários, o primeiro deles é o padrão, com todos os equipamentos em pleno funcionamento; no segundo é considerada a perda da concessionária; e nos outros três cenários ocorre a perda de cada fonte geradora separadamente.

### 3.4.2 Cenário 1 – Padrão

Na Erro: Origem da referência não encontrada é mostrado o diagrama unifilar para a simulação do fluxo de potência no cenário padrão, onde não há perda de nenhum equipamento, sendo considerados todos em pleno funcionamento.

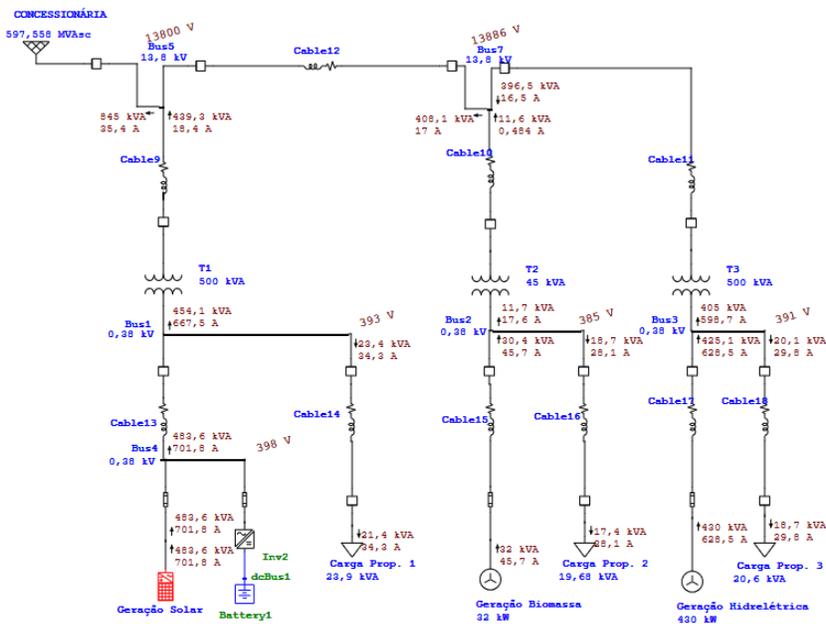


Figura 5 - Fluxo de Potência para o Cenário Padrão

Fonte: Autoria própria (2021) com simulação ETAP.

A propriedade de geração solar gera 483,3 kW, com corrente de 701,8 A, alimentando o ramo de sua carga com 23,4 kW e ficando com 454,1 kW de excedente enviado para a concessionária com 667,5 A na baixa tensão e 18,4 A na média tensão. Com a perda

proveniente dos cabos, a carga dessa propriedade é abastecida com 21,4 kW.

A propriedade de geração a biomassa gera 32 kW, com corrente de 45,7 A, enviando 18,7 kW para o ramo de sua carga e disponibilizando para a concessionária o excedente de 11,7 kW com 17,6 A na baixa tensão e 0,48 A na média tensão. Com a perda gerada nos cabos, a carga dessa propriedade é abastecida com 17,4 kW.

No caso da propriedade de geração hidrelétrica, há geração de 430 kW, com corrente de 628,5 A, para a sua carga é enviado 20,1 kW, após a perda relativa aos cabos, é abastecida com 18,7 kW e corrente de 29,8 A. Assim, a geração excedente é de 405 kW que é enviada para a concessionária com 596,7 A na baixa tensão e 16,5 A na média.

Então, para essa situação o fluxo tem a alimentação de cada propriedade feita pela sua própria fonte e o excedente total de 845 kW, após as perdas, enviado para a concessionária.

### *3.4.3 Cenário 2 – Modo Ilha*

Quando há a perda da conexão com a concessionária, oriunda de um rompimento de cabo ou falha de algum dispositivo, há a abertura do *IntelliRupter* Q1. Para esse cenário não há geração excedente sendo enviada para a concessionária, dessa forma a propriedade de geração solar gera 26,5 kW que abastece suas cargas com 21,8 kW (após perdas) e é enviado 5,12 kW para abastecimento da propriedade de geração de biomassa, a qual gera 9,82 kW que são enviados diretamente para abastecimento de suas próprias cargas, as quais além do valor oriundo da geração solar, também recebe 6,48 kW da geração hidrelétrica. A propriedade de geração hidrelétrica também gera 24,7 kW para abastecimento de suas próprias cargas.

### *3.4.4 Cenário 3 – Falta Geração Propriedade 01*

Com a abertura do disjuntor F4, devido a alguma falha na geração Solar, a geração da propriedade 03 (geração hidrelétrica), produzindo 430 kW e corrente de 628,5A, passa a fornecer energia para a propriedade 01, com 21,8 kW e corrente de 33,2 A, e a propriedade 02 (geração a biogás) continua gerando sua própria energia. Os excedentes gerados, de 383,8 kW, são enviados à concessionária.

### *3.4.5 Cenário 4 – Falta Geração Propriedade 02*

Neste cenário, o fluxo fica de acordo com a apresentada na Figura 36, há a abertura do disjuntor F5 devido a uma falha na geração da propriedade 02. Dessa maneira, a propriedade 03 (geração hidrelétrica) fornece energia para a propriedade 02, para as cargas da própria propriedade.

É possível analisar no fluxo de potência proveniente da geração hidrelétrica para abastecer a propriedade 02 de 18,3 kW e corrente de 0,76 A na média tensão e 27,7 A na

baixa tensão do transformador. O excedente, de 815,4 kW, oriundo da geração solar (439,3 kW) e da geração hidráulica (378,3 kW), é enviado para a concessionária.

### 3.4.6 Cenário 5 – Falta Geração Propriedade 03

Neste último cenário apresentado ocorre a abertura do disjuntor F6 devido a falha na geração hidrelétrica. Segundo o fluxo de potência, para o abastecimento da propriedade 03, são enviados 8,4 kW da geração solar e 11,8 kW proveniente da geração a biomassa, totalizando assim 20,1 kW para abastecer a propriedade 03 com corrente de 0,8 A na média tensão e 30,6 A na baixa tensão do transformador. O excedente, de 429,5 kW, oriundo da geração solar, é enviado para a concessionária.

## 4 | VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

A REN (Resolução Normativa) 482/2012 que estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição elétrica. O Sistema de Compensação de Energia Elétrica, apresentado na REN 482/2012, permite que o excedente gerado pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetado na rede da distribuidora. De acordo com a ANEEL (2016), quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura dos meses subsequentes. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 60 meses. Há ainda a possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão. Para os cálculos foi utilizado a tarifa de 0,61744 R\$/kWh da COPEL para o grupo B2 - Rural, considerando os impostos federais e estaduais. A Propriedade 1 é a com Geração Fotovoltaica, a Propriedade 2 é a com Biogás e a Propriedade 3 é a com Geração Hidrelétrica.

O consumo médio mensal da propriedade 1 é o mesmo para todos os meses do ano, sendo de 17.226,03 kWh, a diferença é na energia injetada na propriedade. Em condições normais de operação, de outubro a março a propriedade 1 entrega todo o excedente gerado (48.107,30 kWh) para a COPEL. E de abril a setembro parte da energia gerada pela propriedade 1 é destinada a propriedade 3 (15.000,00 kWh) e parte para a COPEL (50.333,33 kWh). Isso acontece pois a propriedade 3 não estará produzindo energia durante esse período devido ao perfil das chuvas no estado. Durante todo ano a propriedade 1 gera energia suficiente para suprir o consumo anual de sua própria carga, fazendo com que a fatura cobrada pela COPEL para a propriedade seja de R\$ 0.

O consumo médio mensal para a propriedade 2 é o mesmo para todos os meses do ano, sendo de 14.172,32 kWh. Em condições normais de operação (todas as fontes conectadas entre si e com a concessionária COPEL) a propriedade 2 é capaz de produzir a própria energia que consome. Durante todo ano a propriedade 2 gera energia suficiente

para suprir o consumo anual de sua própria carga, fazendo com que a fatura cobrada pela COPEL para a propriedade seja de R\$ 0. Essa propriedade é a que apresenta menor excedente de geração.

O consumo médio mensal para a propriedade 3 é o mesmo para todos os meses do ano, sendo de 14.851,6 kWh, a diferença é na energia injetada na propriedade. Em condições normais de operação (todas as fontes conectadas entre si e com a concessionária COPEL), de outubro a março a propriedade 3 entrega todo o excedente gerado (62.570,51 kWh) para a COPEL. E de abril a setembro recebe parte da energia gerada pela propriedade 1 (15.000,00 kWh). Durante todo ano a propriedade 3 gera energia suficiente para suprir o consumo anual de sua própria carga, fazendo com que a fatura cobrada pela COPEL para a propriedade seja de R\$ 0.

A Tabela 2 apresenta o custo de instalação do projeto por kW. Esses são dados de 2019 apresentados pela International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020) que levam em conta os custos médios de investimento do projeto e também os custos médios de operação e manutenção. Os dados da IRENA (2020) levam em conta uma vida útil de 25 anos para a propriedade com geração fotovoltaica, 20 anos para a propriedade com geração a biogás e 30 anos para a propriedade com mini geração hidráulica. Para a conversão do custo foi utilizado o valor do dólar comercial no mês de abril de 2021, sendo de R\$ 5,34, de acordo com dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2021). Também é levado em conta o preço de 3 IntelliRupters, o preço foi retirado de City Of Rochelle (2017) como sendo de US\$ 52.985,00. O preço dos outros 4 IntelliRupters são considerados como pagos pela concessionária de energia hidrelétrica.

Geração	Custo De Instalação (Us\$/Kw)	Custo De Instalação (R\$/Kw)	Potência Instalada (Kw)	Custo De Instalação (R\$)
<b>Solar Fotovoltaica</b>	1040	5.361,41	488,4	2.618.512,64
<b>Biomassa E Biogás</b>	2000	10.310,4	20	206.208,00
<b>Energia Hidrelétrica</b>	1641	6.459,68	500	3.229.840,00

Tabela 2 - Custo da instalação e geração de energia.

Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

## 4.1 Comercialização de Energia

No final do ano de 2020, a COPEL abriu uma chamada pública (Chamada Pública COPEL DIS GD 001/2020) com o interesse na compra de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração distribuída para a constituição de microrredes. Para a participação é necessário um mínimo de 1 MW de potência instalada, e o projeto aqui apresentado tem 1,0084 MW, e é necessário que todos os ativos devem estar aptos para a operação em modo ilha. O preço máximo estabelecido é de 311 R\$/MWh e é o valor a ser utilizado no cálculo do retorno do investimento, em um cenário onde a energia excedente esteja sendo comercializada.

Para a execução do projeto, assim como MS Aziz (2020) e Nunes (2017) demonstram, é necessário, no mínimo, o cálculo do capital inicial, o Payback e taxa interna de retorno do projeto (TIR ou em inglês IRR). O payback e a TIR, são ferramentas que verificam a viabilidade econômica do projeto, o primeiro nos dá quantos anos são necessários para reaver o montante investido, já a TIR nos mensura qual será o percentual de retorno do projeto.

Para o cálculo do tempo de retorno do investimento (Payback) foi usada tanto a economia mensal quanto os valores de venda de energia, de acordo com a equação (XV), e o tempo de Payback é apresentado na Tabela 3.

$$Payback = Investimento\ Inicial / (Economia\ Mensal + Venda\ Mensal) \tag{XV}$$

Geração	Custo De Instalação (R\$)	Economia Mensal (R\$)	Venda Mensal De Excedente (R\$)	Payback (Anos)
Solar Fotovoltaica	2.995.318,14	10.575,00	12.628,87	10,76
Biomassa E Biogás	624.699,90	8.688,82	70,81	5,94
Energia Hidrelétrica	2.539.089,90	9.108,28	9.752,74	11,22

Tabela 3 - Tempo para Payback

Fonte: Autoria Própria (2021).

A coluna da Tabela 3 que representa a venda de excedentes é o valor médio da venda mensal de cada propriedade. Esse valor é dado pelo produto do crédito médio mensal de cada propriedade pelo valor máximo de venda de 311 R\$/MWh. Esses mesmos valores da venda, após o investimento ser pago, é o lucro médio mensal de cada propriedade.

As figuras Figura 7, Figura 8 e Erro: Origem da referência não encontrada representam o gráfico do fluxo de caixa anual de cada propriedade (propriedade 1, propriedade 2 e propriedade 3, respectivamente) ao longo da vida útil de cada projeto de geração. O ponto onde o valor do fluxo de caixa se iguala a zero é o valor do Payback.

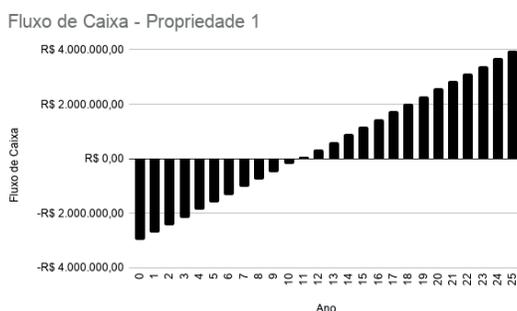


Figura 7 - Fluxo de caixa da Propriedade 1.

Fonte: Autoria Própria (2021).

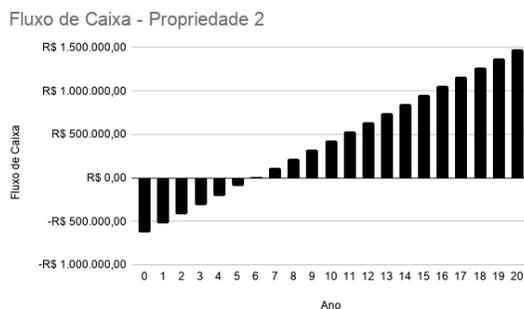
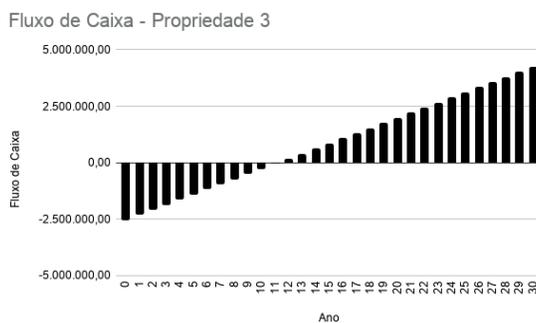


Figura 8 - Fluxo de caixa da Propriedade 2.

Fonte: Autoria Própria (2021).



Fonte: Autoria Própria (2021).

Para o cálculo da TIR foi utilizada a Equação (XVI) em um período de 25 anos para a propriedade com geração fotovoltaica, 20 anos para a propriedade com geração a biogás e 30 anos para a propriedade com minigeração hidráulica, e os valores apresentados foram de 3% para a propriedade com geração Fotovoltaica, 13% para a propriedade com geração a Biogás e 5% para a propriedade com Geração Hidrelétrica. Levando em conta a taxa SELIC em abril de 2021 de 2,75% ao ano (Banco Central do Brasil, 2021) como valor que representa a taxa mínima de atratividade, esses valores nos apresentam que o investimento no projeto é algo viável por serem maiores que a taxa SELIC.

$$i = inFC * i(1 + TIR)^i - InvestimentoInicial = 0 \quad (XVI)$$

Onde 'FC' é o fluxo de caixa, 'i' o período de cada investimento e 'n' o período final do investimento.

## 5 | CONCLUSÃO

Em um mundo onde o uso de energia elétrica se tornou vital, novos caminhos para a gestão dessa demanda e suprimento crescentes se tornam primordiais. As ferramentas

que são utilizadas para o gerenciamento de toda essa cadeia de fluxo não são novas, mas a possibilidade da integração e independência cada vez maior do usuário final ainda é algo de grande interesse para as companhias de energia elétrica, pela descentralização e principalmente pela redução da enorme carga que recai sobre as principais fontes atuais utilizadas na geração de energia, que apesar de renováveis, necessitam de um tempo útil para se restabelecer

O Paraná e seu potencial em geração de energias renováveis, como o biogás, a fotovoltaica e as micro geradoras hidrelétricas, e por suas áreas cujo fornecimento de eletricidade pode ser facilmente prejudicado, principalmente por condições adversas de tempo e a demora na sua manutenção apresenta potencial para inovação e investimento em novas maneiras de gerar, distribuir, transportar e armazenar energias. O consumidor final, neste estudo o agronegócio, também poderá se tornar o seu próprio fornecedor de energia elétrica e ainda contribuir com a sociedade ao seu redor e ser beneficiado compartilhando o excedente de geração seja através de sistema de Compensação de Energia Elétrica ou através da venda.

As fontes apresentadas no trabalho demonstram a capacidade de dar autonomia para cada propriedade no seu próprio fornecimento energético e com qualidade. A geração distribuída pode ser implementada em qualquer local que apresente um potencial de geração, pela quantidade de insumos disponíveis, junto a um estudo sobre o consumo da propriedade e o capital de investimento. Além disso, propriedades vizinhas podem se unir para compartilhar essa energia entre si em uma microrrede, e em caso da falta de alguma das unidades de geração e fornecimento, existe a possibilidade de alguma outra propriedade suprir essa demanda das cargas pelo restabelecimento otimizado da rede, o que aumenta a certeza de um fornecimento contínuo, e existem tecnologias habilitadoras para isso como apresentado ao longo deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida++2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>. Acesso em: 25 de março de 2021.

AZIZ, Muhammad Shahbaz. **Rural Electrification through an Optimized Off-grid Microgrid based on Biogas, Solar, and Hydro Power**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9048222>. Acesso em: 13 de novembro de 2020.

BALFAR SOLAR. **Datasheet Painel Nacional BS72M – 370W, 2019**. Disponível em: <http://balfarsolar.com.br/wp-content/uploads/2019/10/BALFAR-DATASHEET-MONO-370W.pdf>. Acesso em: 25 de Outubro de 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **[Site Institucional]**, 2021. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 09 de abril de 2021.

CAMPOS, Bruna Andrade. **Modelagem de sistemas de geração distribuída com motores de combustão interna invertidos a biogás**, 2018. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNIOESTE-1\\_a787378c97129ce80afa1fe29f6eaf68](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNIOESTE-1_a787378c97129ce80afa1fe29f6eaf68). Acesso em: 29 de outubro de 2020.

CITY OF ROCHELE. **Universal Utility Supply Co.**, 2017. Disponível em: <https://www.cityofrochelle.net/government-documents/city-council-agendas-and-minutes/agendas/2017-city-council-meeting-documents/2017-09-11-agenda/5090-5-uusco-quote/file.html>. Acesso em: 26 de abril de 2021.

CLIMATE. **Dados climatológicos Paraná**. [20-?]. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americado-sul/argentina/entre-rios/parana-1897/>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2021.

COPEL. [Site Institucional]: **Biomassa**, 2016. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201>. Acesso em: 01 de novembro de 2018.

COPEL. **Normas técnicas Copel: NTC905200**, 2018. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/verdocatual/E59DF9E94B635F678325831D0047F719/\\$FILE/NTC905200\\_Rev04102018.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/verdocatual/E59DF9E94B635F678325831D0047F719/$FILE/NTC905200_Rev04102018.pdf). Acesso em: 09 de abril de 2021.

COPEL. **Taxas e Tarifas**, 2020. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/copel-distribuicao/taxas-tarifas/>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balçoço Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 10 de outubro de 2019.

ERBR. **Grupo Geradores**, 2020. Disponível em: <https://www.erbr.com.br/produtos/1/grupo-geradores>. Acesso em: 01 de novembro de 2020.

FANG, X. S; MISRA, G; XUE, E D; YANG. 2012. **“Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey”**. IEEE Communications Surveys Tutorials 14 (4): 944–80. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>. Acesso em: 17 de novembro de 2018.

FARHANGI, Hassan. **The path of the smart grid**. IEEE power and energy magazine, v. 8, n. 1, 2010.

G1 PRESIDENTE PRUDENTE E TV FRONTEIRA. **Sem energia elétrica e sistema de ventilação, cerca de 6 mil aves morrem por causa do forte calor em granja em Adamantina**, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/presidente-prudente-regiao/noticia/2020/10/01/sem-energia-eletrica-e-sistema-de-ventilacao-cerca-de-6-mil-aves-morrem-por-cao-do-forte-calor-em-granja-em-adamantina.ghtml>. Acesso em: 28 de outubro de 2020.

GENERAL CABLE. **Cabos de baixa tensão**, 2020. Disponível em: [https://www.generalcable.com/eu/assets/CatalogLibrary/Power-and-Low-Voltage/0200-C0050-0P-Low-Voltage-eBook-2020\\_07.pdf](https://www.generalcable.com/eu/assets/CatalogLibrary/Power-and-Low-Voltage/0200-C0050-0P-Low-Voltage-eBook-2020_07.pdf). Acesso em: 29 de abril de 2021.

GENERAL CABLE. **Cabos de média tensão**, 2021. Disponível em: <https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Catalogo-Cabos-de-Media-Tensao.pdf?ext=.pdf>. Acesso em: 09 de abril de 2021.

GROTH, Júlio Augusto. **Usina de geração fotovoltaica**. 2013.

HUAYLLAS, T. **Micro-redes elétricas: Estado da Arte e contribuição para o dimensionamento, aplicação e comercialização da energia produzida**. 2015.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2019**, 2020. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf). Acesso em: 25 de março de 2021.

KASIM, Naseer, HUSSAIN, Hazim. **Performance Improvement of CIGS PV Solar Grid Tied System Using Planer Concentrators, Case Study : Baghdad**. 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/342736081\\_Performance\\_Improvement\\_of\\_CIGS\\_PV\\_Solar\\_Grid\\_Tied\\_System\\_Using\\_Planer\\_Concentrators\\_Case\\_Study\\_Baghdad](https://www.researchgate.net/publication/342736081_Performance_Improvement_of_CIGS_PV_Solar_Grid_Tied_System_Using_Planer_Concentrators_Case_Study_Baghdad). Acesso em: 05 de novembro de 2020.

NOGUEIRA, Carlos. **Dimensionamento de sistemas integrados de energia em ambientes rurais**, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88061/208617.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2021.

NUNES, Angelo. **Análise de viabilidade econômica de geração de energia elétrica a partir de biogás de suinocultura**, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/178021>. Acesso em: 30 de outubro de 2020.

PIFTSCHER, L. **Reconfiguração Automática das redes de distribuição de energia elétrica com monitoramento em tempo real**. 2013.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**, 2011. Barueri, SP: Manole.

S&C. **Rethinking Your Lateral Protection Strategy**, 2019. Disponível em: <https://www.sandc.com/globalassets/sac-electric/documents/sharepoint/documents---all-documents/educational-material-461-4500.pdf?dt=637423025391886889>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2021.

S&C Eletric Company. **Soluções para Microrredes**, 2018. Disponível em: <https://www.sandc.com/pt/solucoes/solucoes-para-microrredes/>. Acesso em: 17 de novembro de 2018.

TIEPOLO, G.; JUNIOR, Osiris Canciglieri; JUNIOR, Jair Urbanetz. **Estudo do potencial de participação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica do Estado do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. 2014.

TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1ª Edição. Curitiba: UTFPR, 2017.

WEG. **DWB e DWA - Disjuntores em Caixa Moldada**, 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h83/hd0/WEG-disjuntores-em-caixa-moldada-dw-50009825-catalogo-pt.pdf>. Acesso em: 28 de abril de 2021.

WEG. **Energia Hidrogeradores**, 2015. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h28/hf8/WEG-hidrogeradores-50005371-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2021.

WEG. **Nobreak enterprise: tecnologia avançada para proteção de sistemas críticos**, 20-?. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7e/hb0/WEG-nobreak-enterprise-50102821-pt.pdf>. Acesso em: 29 de outubro de 2020.

WEG. **SIW - Inversores String**, 201-?. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha4/h35/WEG-inversores-string-SIW500H-SIW300H-50076575-pt.pdf>. Acesso em 28 de outubro de 2020.

WEG. **Transformador Óleo 500kVA**, 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/301-a-3-000-kVA/Transformador-%C3%93leo-500-0kVA-13-8-0-38kV-CST-ONAN/p/14367708>. Acesso em: 28 de outubro de 2020.

*Data de aceite: 01/07/2021*

*Data de submissão: 06/05/2021*

### **Bruno Tiago Carneiro Moraes**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia  
<http://lattes.cnpq.br/5790574215235836>

### **Felipe Cléber Silveira**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

### **Averton da Silva Portigo**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

### **Daliel Soares de Souza**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

### **Rafael José Fonseca Barbosa**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

### **Franciani Diniz Branco**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

### **Marcus Vinícius O. Braga**

Centro Universitário São Lucas  
Porto Velho - Rondônia

**RESUMO** : Criaremos um medidor de energia elétrica, mais conhecido como o famoso “relógio de luz”, este que se tem o objetivo de contabilizar e mensurar o consumo de energia

elétrica consumido por uma determinada carga, tendo assim o controle, análise e administração do uso de energia consumida. E como todos os equipamentos possuem sua história, assim historicamente falando, em 1889 se teve o primeiro medidor de quilowatt-hora de corrente alternada por indução foi apresentado ao público pelo húngaro Ottó Bláthy. Ele mostrou o medidor de energia na Feira de Frankfurt e o sucesso foi tão grande, que no mesmo ano ele já estava sendo comercializado. Atualmente no Brasil as concessionárias utilizam os medidores de energia eletrônico, como próprio nome já diz, funciona eletronicamente, ou seja, a sua medição é realizada digitalmente. A tecnologia usada nos medidores eletrônicos é muito mais moderna que os analógicos, que em alguns lugares ainda se usam os analógicos. A construção do medidor será baseada na tecnologia Arduino Uno onde sensores ou módulos de corrente e de tensão verificam o consumo em tempo real, através do processamento e envio dos dados para um computador através da conexão USB e no display LCD 16x2, o onde conseguiremos acompanhar todo o consumo em tempo real.

**PALAVRAS - CHAVE:** Arduino Uno, Tensão, Corrente, Medidor, Consumo, energia elétrica.

### ELECTRICITY CONSUMPTION METER

**ABSTRACT:** We will create an electric energy meter, better known as the famous “light clock”, which has the objective of accounting and measuring the consumption of electric energy consumed by a given load, thus having the control, analysis and administration of the use of

energy consumed. And since all equipment has its history, so historically speaking, in 1889 the first kilowatt hour meter of alternating current was induced by the Hungarian Ottó Bláthy. He showed the energy meter at the Frankfurt Fair and the success was so great that in the same year it was already being sold. Currently in Brazil, dealerships use meters and electronic energy, as its name implies, it works electronically, that is, its measurement is performed digitally. The technology used in electronic meters is much more modern than analog ones, which in some places still use analog ones. The construction of the meter will be based on Arduino Uno technology where current or voltage sensors or modules check consumption in real time, through the processing and sending of data to a computer via the usb connection and on the 16x2 lcd display, which we will be able to monitor all consumption in real time.

**KEYWORDS:** Arduino Uno, Voltage, Current, Meter, Consumption, Electricity.

## 1 | INTRODUÇÃO

O projeto é um medidor para monitoramento de consumo de tensão, corrente elétrica em tempo real utilizando a tecnologia Arduino uno.

O intuito principal do monitoramento em tempo real que seja de forma fácil, faça com que temos as medições em tempo real do consumo de tensão, corrente e os gastos em Watts. Com isso temos uma base de como calculamos qual será o valor em reais no consumo da energia pelo equipamento.

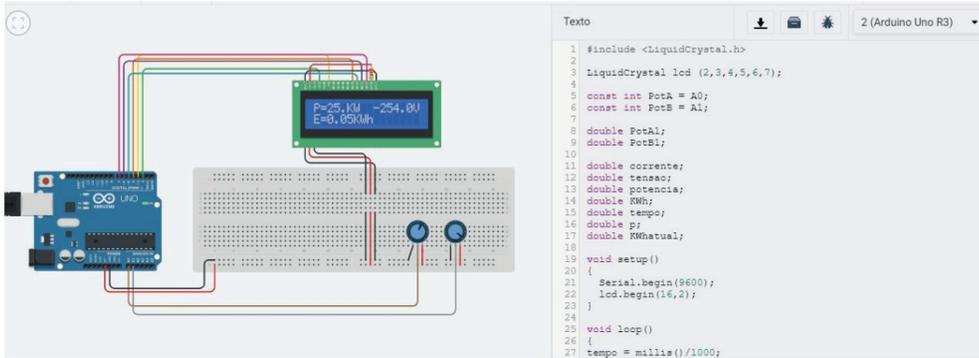
## 2 | DESENVOLVIMENTO

Neste projeto que estamos a desenvolver, utilizaremos a tecnologia do Arduino uno e seus componentes (módulos e sensores), e serão necessários sensores de monitorando em tempo real, a tensão e corrente do circuito a ser medido eletronicamente. Realizaremos a programação, os sinais dos sensores serão filtrados e tratados pelo Arduino, posteriormente mostrados no display, com informações de corrente, tensão e potência do circuito em funcionamento. Tendo em vista o custo da elaboração do projeto, se torna inviável para produção em massa, por hoje no mercado temos produtos com a mesma função, mas com preço aquisitivo bem inferior. O intuito principal do monitoramento em tempo real que seja de forma fácil, e que ao mesmo se faça as medições em tempo real do consumo de tensão, corrente e o gasto consumido em Watts.

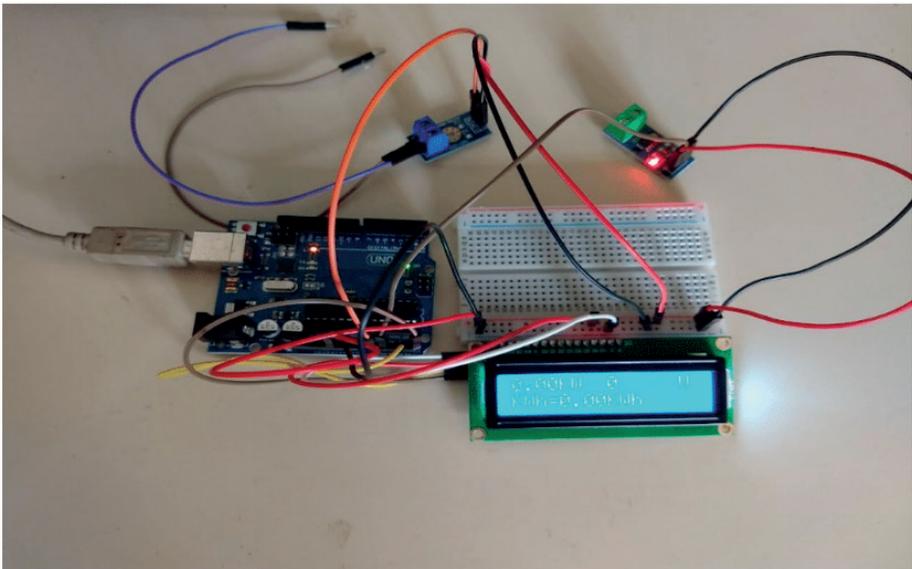
Com isto o consumidor terá uma estimativa de cálculo a qual será o valor em reais em energia consumida pelo equipamento ou carga. Outra vantagem, o consumidor terá uma prévia sobre seu consumo e não terá a surpresa dos valores a pagar com a chegada da conta ou fatura de energia.

Para simularmos o funcionamento do medidor, utilizamos o tinkercad, mais sendo limitado em sensores e módulos fizemos algumas alterações colocando potenciômetros para podermos simular esses módulos. Com intuito de auxiliar na elaboração e construção do medidor de energia.

## Simulação do medidor de energia.



## Protótipo Pronto.



## 3 | CONCLUSÕES

A construção do medidor utilizando a tecnologia Arduino Uno tem como o intuito de aprendermos como funciona um medidor de energia elétrico, como contabilizar e mensurar o consumo de energia elétrica consumido por uma determinada carga, tendo assim o controle, análise e administração do uso de energia consumida.

Além disso podemos fazer várias modificações ou upgrades de acordo com a nossa criatividade, pois o arduino é uma tecnologia open source (software Livre). Podendo aceitar vários módulos ou sensores, sabendo programar eles no arduino uno ficando cada vez mais incrementado o projeto até mesmo um equipamento que não existe ainda no mercado

podendo ser utilizado por um consumidor interessado por ele.

## REFERÊNCIAS

<https://www.filipeflop.com/blog/medidor-de-energia-eletrica-com-arduino/> <acessado em: 10/04/2020>

<https://create.arduino.cc/projecthub/team-niuanbarreto/medidor-de-energia-eletrica-6506fe> <acessado em: 10/04/2020>

<https://www.citisystems.com.br/medidor-de-energia-eletrica/> <acessado em: 10/05/2020>

<https://www.tinkercad.com/> <acessado em: 10/05/2020>

## FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍPTICA

Data de aceite: 01/07/2021

### **Paulo Fernandes da Silva Júnior**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís – Brasil.

### **Ewaldo Eder Carvalho Santana**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís – Brasil.

### **Paulo Henrique Bezerra de Carvalho**

Instituto Federal do Maranhão  
São Luís – Brasil.

### **Danilo Diniz Meireles**

Faculdade NetCom  
São Luís – Brasil.

### **Francarll Oliveira Moreno**

Faculdade NetCom  
São Luís – Brasil.

### **Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira**

Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa – Brasil.

### **Pedro Carlos de Assis Júnior**

Universidade Estadual da Paraíba  
Patos – Brasil.

### **Raimundo Carlos Silvério Freire**

Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – Brasil.

**RESUMO:** Neste trabalho são desenvolvidos filtros planares com geometria elíptica para aplicação nas bandas industrial, científica e médica e de redes locais sem fio, nas faixas de 1,6 GHz a 4,1 GHz, cobrindo as faixas propostas pelos protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b, construídos em fibra de vidro, material de baixo custo. No trabalho foi desenvolvida uma metodologia com a aproximação da frequência de ressonância a partir da área total do filtro. A variação da área do filtro pela excentricidade promove a variação da frequência de ressonância e da largura de banda. No desenvolvimento do projeto foram simulados e construídos três filtros com excentricidade de 0,3, 0,6 e 0,9, pelos resultados pode-se observar que a variação da excentricidade promoveu a variação da frequência de ressonância, largura de perda de retorno, e que o filtro com excentricidade de 0,9 apresentou rejeição nas bandas de frequência de operação dos filtros com valores de 0,3 e 0,6.

**PALAVRAS - CHAVE:** Filtros planares, geometria elíptica, excentricidade.

### **BROADBAND MICROSTRIP FILTER WITH ELLIPTICAL GEOMETRY**

**ABSTRACT:** In this work, planar filters with elliptical geometry are developed for application in industrial, scientific, and medical bands and in wireless local area networks, in the bands from 1.6 GHz to 4.1 GHz, covering the bands proposed by the protocols IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b, built in fiberglass, low-cost material. In the work, a methodology was developed with the approximation of the resonant frequency from the total filter area. The variation of the filter area by

the eccentricity promotes the variation of the resonant frequency and the bandwidth. In the development of the project, three filters were simulated and built with an eccentricity of 0.3, 0.6, and 0.9, from the results it can be observed that the eccentricity variation promoted the variation of the resonance frequency, return loss width, and that the filter with an eccentricity of 0.9 presented rejection in the operating frequency bands of the filters with values of 0.3 and 0.6.

**KEYWORDS:** Planar filters, elliptic geometry, eccentricity.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os filtros de microfita são estruturas planares, utilizadas em diversos circuitos sistemas de comunicação, operando em faixas de VHF, UHF e Microondas (BALANIS, 2016). O filtro elétrico pode ser compreendido como um quadropolo com a propriedade de selecionar determinadas frequências, rejeitando as demais, sendo utilizados em sistemas de telecomunicações WiFi, tecnologias de 3G, 4G, 5G, comunicação via satélite, aplicações militares, médicas e aparelhos domésticos (PERTENCE JUNIOR, 2003), (HONG, 2019), (CASIMIRO; EMÍDIO, 2003).

Os filtros podem ser divididos em duas categorias os quais levam em consideração os dispositivos em sua composição, como filtros (PERTENCE JUNIOR, 2003):

- Passivos, os quais não precisam de uma fonte externa para seu funcionamento e que utilizam apenas elementos passivos, como indutores, capacitores e resistores;
- Ativos, estes necessitam de alimentação externa para seu funcionamento, como os amplificadores operacionais.

Existem também uma qualidade de filtros chamado de planares, os quais utilizam estruturas planas, geralmente construídos na tecnologia de microfita, podendo assumir diversas geometrias. Uma estrutura em microfita possui um elemento condutor separado de um plano de massa por um dielétrico, e têm características de dimensões compactas, fácil integração em circuitos ou módulos de desenvolvimento, podendo ser multibanda, operando em mais de uma frequência de ressonância, em banda larga ou estreita, de baixo custo e ampla aplicação nos sistemas de telecomunicações, sensoramento, entre outros (HONG, 2019), (CRNOJEVIC-BENGIN, 2015), (HONG, 2011).

Uma das formas do uso da microfita como filtro é levar em consideração a distância entre os elementos condutores, o qual permite a atenuação de determinadas frequências do espectro do sinal de entrada ao mesmo tempo em que dá passagem para outras faixas de frequência (BALANIS, 2016). Em muitas aplicações, apenas uma faixa exclusiva de frequências tem real interesse e com esse propósito foram desenvolvidos dispositivos passivos, ou seja, os filtros de alta frequência, que têm como características fundamentais a seleção, eliminação ou separação de sinais com bandas de frequências diferentes. Nesse sentido, os filtros de microfita apresentam um papel bastante relevante

nos dispositivos sem fio, de rede e telefonia celular, algo que vem estimulando cada vez mais a sua miniaturização (HONG, 2019), (GOMEZ-GARCIA; GONG, 2014).

As pesquisas em filtros planares se destacam como resposta de banda passante dupla, que se utiliza de ressoadores com impedâncias do tipo degrau (SIR – *Stepped Impedance Resonator*), esses filtros de microfita apresentam linhas acopladas paralelas em banda larga (CHEN, et al., 2003). Trabalhos como o de (SATTHAMSAKUL, et al., 2008) utilizam multicamadas de filtros de microfita, que apresentam um conjunto de linhas acopladas. Na pesquisa de (CHEN et al. 2006) projetos de filtro de microfita tríplice, com uma carga de acoplamento intensa foram desenvolvidas. Um filtro de microfita baseado num ressoador indutivo de um quarto do comprimento de onda foi aplicado por (WEI; JAI; ZHU, 2011). Outras pesquisas levam a trabalhar com superfícies seletivas em frequência (FSS – *Frequency Selective Surface*) as quais tem estrutura com apenas uma camada de elemento condutor e uma ou mais camadas de dielétricos, dependendo do tipo de resposta desejada (SILVA JUNIOR, et al, 2017) (MUNK, 2003).

Neste trabalho são desenvolvidos filtros de microfita com simetria elíptica, em que a área do dispositivo funciona como um seletor de bandas de frequências, operando nas frequências entre 1,6 GHz a 4,1 GHz cobrindo frequência da banda ISM, e faixas de redes locais sem fio, nos protocolos do IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b. Este trabalho está dividido da seguinte forma: na seção 2 são abordados os materiais e métodos utilizados. Na seção 3 são apresentados os resultados simulados e medidos, com as devidas considerações; as considerações finais a respeito do projeto do filtro elíptico são apresentadas na seção 4.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Filtros

Um filtro é uma rede composta de duas portas, ou mais portas, que apresenta um conjunto de elementos de armazenamento de energia, que podem ser indutores, capacitores e linhas de transmissão. Tais dispositivos tem como finalidade a obtenção de frequências características dependentes, garantindo a transmissão de sinais requeridos em uma determinada banda de passagem ao mesmo tempo em que rejeitam ou atenuam na chamada banda de rejeição. Esse comportamento pode ser obtido por meio das mais diversas associações de capacitores e indutores. Verifica-se que blocos de capacitores DC bloqueiam baixos níveis de frequências ao mesmo tempo em que dão passagem para frequências mais altas. Já os indutores apresentam características opostas aos capacitores, uma vez que bloqueiam as frequências mais altas permitindo que baixas frequências passem por eles. Estes elementos recíprocos possibilitam diferentes configurações e a classificação de quatro tipos diferentes de filtros (WILLIAMS; ARTHUR; TAYLOR, 1995), (PERTENCE JUNIOR, 2003):

- Filtro Passa Baixas, onde há a passagem de frequências localizadas abaixo de uma determinada frequência de corte e o bloqueio das demais frequências;
- Filtro Passa Altas, onde há a passagem de frequências acima de uma determinada frequência de corte e o consequente bloqueio das demais frequências;
- Filtro Rejeita Banda (FRB), caracterizado pelo bloqueio de uma banda de frequências, determinada pelas frequências de corte superior e inferior, ao mesmo tempo que permite que todas as outras frequências;
- Filtro Passa Banda, com o comportamento oposto ao FRB, permite a passagem de uma banda de frequências, determinadas pelas frequências de corte superior e inferior, rejeitando todas as demais frequências.

Devido a todas estas especificações, os filtros demandam muito rigor e atenção para o cumprimento dos requisitos de sua implementação, como seletividade de frequência, tamanho, peso, confiabilidade e desempenho em vários ambientes (LIM, et al., 2002). A partir da energia irradiada pode-se selecionar frequências de ondas indesejadas, possibilitando a diminuição das interferências, o que permite algumas classificações entre os filtros, que os distinguem de acordo com seu comportamento e aplicação.

Existem diversas faixas de frequência de operação para o espectro eletromagnético, como a banda de Frequências Ultra Alta (*Ultra High Frequency* - UHF), cuja faixa vai desde 300 MHz até 3,0 GHz, dentre as quais podem ser destacados as frequências de uso dos canais em TV, a rede locais sem fio operando em 2,4 GHz, os canais para telefonia celular de 2G, 3G e 4G (SHENOI, 2005), (PAARMANN, 2001), (SILVA JUNIOR, et al, 2016), (SILVA JUNIOR, et al, 2016).

Assim como as antenas, os filtros necessitam de uma fonte de alimentação desenvolvida a partir das técnicas das linhas de transmissão a fim de excitar os dispositivos através de duas portas, conforme a esquema simplificado apresentado na Figura 1. Como observado o filtro possui duas portas,  $S_1$  e  $S_2$ , a partir delas é possível identificas os parâmetros como coeficiente de reflexão, que a potência que retorna do sistema para a porta  $S_1$ , designado como parâmetro  $S_{11}$ , e o coeficiente de transmissão, que é a potência que chega à porta  $S_2$ , identificado como  $S_{21}$ . Caso o sistema seja observado de forma contrária, como a porta  $S_2$  sendo a emissora, o parâmetro  $S_{22}$  mede o coeficiente de reflexão da porta  $S_2$  e o parâmetro  $S_{12}$  mede o coeficiente de transmissão da porta  $S_2$  para a porta  $S_1$ .

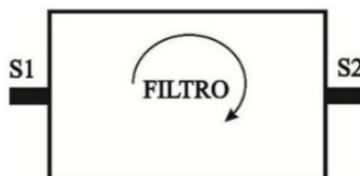


Figura 1- Filtro alimentado por duas portas  $S_1$  e  $S_2$ .

Um parâmetro importante no desenvolvimento dos filtros é o casamento das impedâncias entre a porta e o circuito, no caso de filtros planares, entre a fonte, a linha de alimentação e circuito. Os sistemas de comunicação, em maioria, operam com impedância real de  $50 \Omega$ , assim a linha de transmissão em microfita foram projetadas para uma impedância de  $50 \Omega$ , operando na frequência de 2,4 GHz. A frequência de ressonância central dos filtros propostos neste artigo foi criteriosamente proposta para a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, permitindo sua classificação segundo os critérios dos padrões internacionais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b (BIGGS; HENLEY; CLARKSON, 2004).

Os filtros foram projetados, simulados e construídos em dielétrico FR4, fibra de vidro, com permissividade elétrica ( $\epsilon_r$ ) de 4,4, tangente de perdas de 0,02 e espessura de 1,55mm, com duas faces de cobre com espessura de 0,035mm. As simulações foram realizadas no programa comercial *Ansys Designer™*. Os protótipos foram construídos e medidos no laboratório de medidas do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, no analisador de redes vetoriais da Agilent modelo S5071C (300 kHz–20 GHz).

## 2.2 Geometria Elíptica

No desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações, a geometria dos dispositivos planares, está diretamente relacionado à frequências de ressonância, largura de banda, ganho, polarização, dentro outros, assim a busca de formas que possibilitem parâmetros otimizados, em um ou mais parâmetros é fonte de pesquisa para diversos trabalhos, citando como exemplo temos os arranjos geométricos periódicos como os fractais, as formas bioinspiradas em plantas, uso de equações polares, dentre outros (KUMAR; PARIHAR, 2016), (SILVA JUNIOR, et al, 2019).

A forma geométrica elíptica foi desenvolvida pelo matemático Apolônio de Perga, no século II antes de Cristo, e está contida em um conjunto de curvas conhecidas como cônicas (CARL, 1968). Por muitos séculos essas curvas eram algo de interesse puramente matemático, porém, atualmente as cônicas são geometrias fundamentais nos mais diversos ramos da ciência e seu uso se tornou comum.

Uma elipse, conforme observado na Figura 2 é uma curva que apresenta pontos específicos em sua estrutura:

- Dois focos  $F_1$  e  $F_2$ , separados por uma distância de  $2c$ ;
- Eixo horizontal, que possui uma distância  $2a$ ;
- Eixo vertical, que possui uma distância  $2b$ , onde  $b^2 = a^2 (1 - e^2)$ , em que  $e$  é chamado de excentricidade, ou parâmetro medido pela divisão entre a distância  $c$  pela distância  $a$ .

A área de uma elipse é obtida pela expressão:  $A_{\text{elipse}} = \pi ab$ .

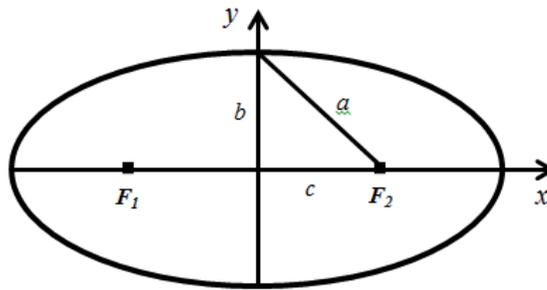


Figura 2 – Identificação dos principais parâmetros da elipse tomando o plano cartesiano como referência.

No desenvolvimento deste projeto foi utilizada a geometria elíptica para o plano superior, mantendo o plano terra sem deformações. A soma das duas regiões, que correspondem aos defeitos no plano superior do filtro, forma uma elipse completa. À medida que é alterado o valor da excentricidade ( $0 < e < 1$ ), modificamos a área das regiões com defeitos elípticos no plano superior do filtro. Essa técnica nos permite determinar um parâmetro de controle do comportamento em frequência do filtro, com variação determinada a partir da variação da excentricidade da elipse. Uma vez que a elipse estará inscrita ao retângulo, sua área total, pode ser calculada pela diferença:

$$A_T = A_R - A_{\text{elipse}}, \quad (1)$$

Dessa forma, para cada valor da excentricidade obtém-se elipses com áreas diferentes e conseqüentemente, a diferença entre a área do retângulo e a área da elipse causará efeitos diferentes no filtro. Para cada efeito temos um comportamento diferente para as bandas de frequências sendo possível estimar um valor específico para a excentricidade e garantir regiões passantes ou de rejeição para o filtro de microfita, desenvolvido a partir de uma região retangular pré-escolhida de área  $A_R = 2ab$ .

Na Figura 3 pode ser visualizada o plano superior do filtro elíptico com deformação elíptica. O plano inferior tem a função de plano de terra com a mesma área da placa retangular.

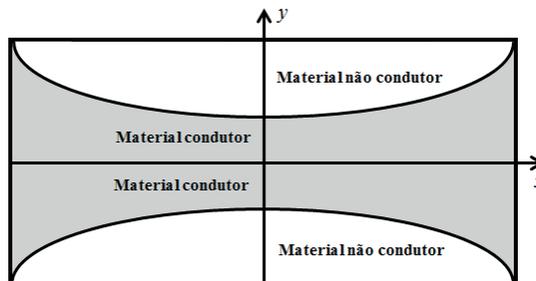


Figura 3 – Esquemático de um filtro com deformação elíptica.

### 3 | FILTRO ELÍPTICO RESULTADOS E DISCURSÕES

Os parâmetros de simulação foram determinados de maneira a garantir que a alimentação dos filtros elípticos fosse realizada por uma linha de microfita com largura ( $W_0$ ) de 1,5 mm de largura (com dimensão  $2b$   $W_0$ ).

Um cabo coaxial de  $50\Omega$  conecta-se à linha de alimentação do elemento patch através de um conector SMA, como observado na Figura 4. Os dados obtidos nestas simulações estão organizados na Tabela 1.

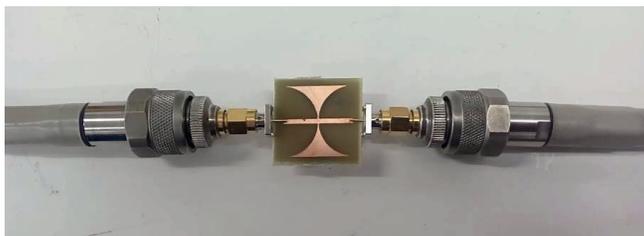


Figura 4 – Protótipo ligado com conectores SMA de  $50\Omega$ .

Frequência Central (GHz)	Área Total (mm <sup>2</sup> )	Excentricidade ( $e$ )
2,17	103,87	0,0
2,18	105,77	0,1
2,36	111,55	0,2
2,68	121,38	0,3
2,72	135,60	0,4
3,02	154,78	0,5
3,54	179,89	0,6
4,12	212,53	0,7
3,46	255,92	0,8
2,80	318,31	0,9
0,00	484,00	1,0

Tabela 1 – Dados teóricos obtidos nas simulações sucessivas usando o parâmetro de excentricidade ( $e$ ) como referência.

Os dados apresentados na Tabela 1 mostra que a banda ISM pode ser verificada para filtros elípticos com excentricidade que satisfaçam a variação:  $0,2 < e < 0,3$ . Após as simulações foi realizada a interpolação pela fórmula de Thiele (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1972), dada por:

$$F(x) = F(x_1) + \frac{x - x_1}{\rho_1 + \frac{x - x_2}{\rho_2 - F(x_1) + \frac{x - x_3}{\rho_3 - \rho_1 + (\dots)}}}, \quad (1)$$

em que  $\rho_n = \rho_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representa uma diferença recíproca, que tem a forma geral,

$$\rho_n = \frac{x - x_n}{\rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) - \rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)} + \rho_{n-2}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}); \quad (2)$$

Na Figura 5 podem ser visualizados os resultados interpolados pela fórmula de Thiele, calculados sem a linha de alimentação. Como observado a relação entre a excentricidade e a área se aproxima de uma relação exponencial.

A relação experimental entre a área total do filtro e a excentricidade do defeito elíptico, assumindo os dados da Tabela 1 para a área total e excentricidade,  $\{e_n, A_T(e_n)\}$  com  $n = \{1, 2, 3, \dots, 12\}$ , pode ser aproximada por:

$$A_T(e) \cong - \frac{922,4413657 [f_1(e) f_2(e) f_3(e)]}{f_4(e) f_5(e) f_6(e) f_7(e)}, \quad (3)$$

obtendo

$$\begin{aligned} f_1(e) &= e^2 + 0,006374794171 e + 0,6210340494; \\ f_2(e) &= e - 1,294165737; \\ f_3(e) &= e - 1,019517606; \\ f_4(e) &= e - 2,645825290; \\ f_5(e) &= e - 1,208368008; \\ f_6(e) &= e - 1,016025562; \\ f_7(e) &= e - 2,2402441925. \end{aligned} \quad (4)$$

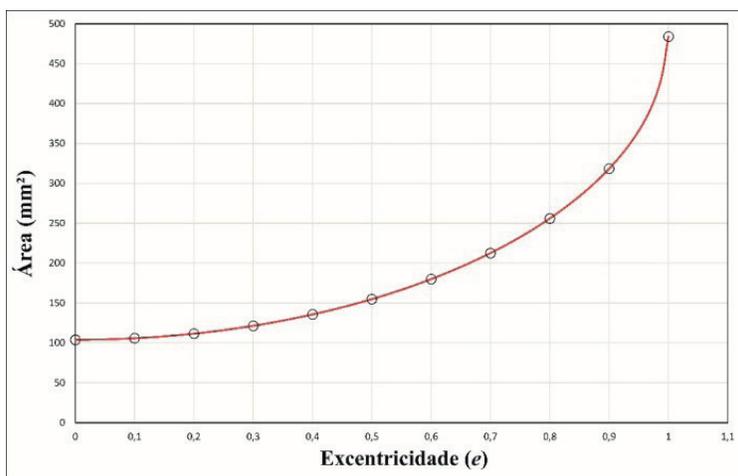


Figura 5 – Relação da área total do filtro pela excentricidade obtida pela interpolação dos pontos da Tabela 1.

A relação entre a área do filtro elíptico e a frequência central a partir dos dados da Tabela 1 e a Equação (2), pode ser indicada por:

$$f_r(A_T) \cong - \frac{0,8221132496 [f_1(A_T) f_2(A_T) f_3(A_T)]}{f_4(A_T) f_5(A_T) f_6(A_T)}, \quad (5)$$

obtendo,

$$\begin{aligned} f_1(A_T) &= A_T^2 - 559,1526099 A_T + 87442,29199; \\ f_2(A_T) &= A_T^2 - 227,8202856 A_T + 12977,87569; \\ f_3(A_T) &= A_T - 484,0000006; \\ f_4(A_T) &= A_T^2 - 468,3959701 A_T + 59338,51926; \\ f_5(A_T) &= A_T^2 - 228,3167764 A_T + 13033,16213; \\ f_6(A_T) &= A_T - 363,7682011. \end{aligned} \quad (6)$$

A combinação das Equações (5) e (6), desenvolvidas com o valor fixo de área  $A = 484 \text{ mm}^2$  para a placa com o material dielétrico na simulação, permite a aproximação da ressonância principal com uma precisão de aproximadamente 1,1%, em um intervalo de  $0 < f_r \leq 4,12 \text{ GHz}$ .

## 4 | RESULTADOS E DISCURSÕES

No desenvolvimento do projeto foi utilizado como valor inicial a frequência de ressonância ( $f_r$ ) de 2,45 GHz na Equação (6), que retorna o resultado  $A_T = 119,31 \text{ mm}^2$ . Substituindo este valor na Equação (5) encontra-se o valor para a excentricidade do filtro elíptico,  $e = 0,2271694825$ .

Na simulação do filtro foi usada uma placa quadrada de lado  $2B = 22 \text{ mm}$ , e inserido o efeito elíptico com os valores  $a = 11 \text{ mm}$  e  $b = 10,71240763 \text{ mm}$ , obtido a partir da excentricidade. As dimensões da linha de alimentação foram escolhidas de forma a garantir um bom casamento de impedância, apesar da miniaturização do filtro, com o comprimento da linha de microfita de  $2B$  e a largura  $W_o = 1,7 \text{ mm}$ .

Na Figura 6 pode ser observado o resultado simulado do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) do filtro elíptico com parâmetros:  $A_T = 119,3059535 \text{ mm}^2$ ;  $a = 11 \text{ mm}$ ;  $b = 10,71240763 \text{ mm}$ ;  $2B = 22 \text{ mm}$  e  $W_o = 1,7 \text{ mm}$ , com a indicação de largura de banda (LB) e as dimensões da estrutura simulada e de uma moeda comparativa, de raio  $r = 12 \text{ mm}$ . O resultado obtido para esta simulação foi um filtro que opera na frequência central de  $f_r = 2,4230 \text{ GHz}$ , que corresponde a um erro de aproximadamente 1,1% em relação à frequência central pretendida para este primeiro teste com uma largura de banda, região para valores proibidos de frequência, de LBs = 1,99 GHz (1,76 – 3,76 GHz), englobando os 27 canais de operação oferecidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B. É importante frisar que

este excelente resultado só foi possível graças ao uso dos valores exatos das dimensões obtidas com o uso das Equações (4) e (5).

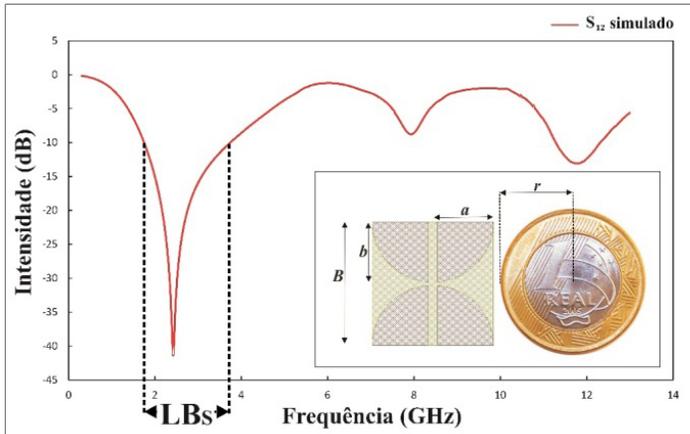


Figura 6 – Filtro Elíptico Simulado.

A partir dos resultados obtidos foram construídos três protótipos com valores de excentricidade:  $= \{0,3; 0,6; 0,9\}$ .

Na Figura 7 pode ser observado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão  $S_{21}$  do filtro elíptico com excentricidade  $e = 0,3$ , parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 10,493$  mm. Foi observada a frequência de ressonância simulada de  $f_r = 2,55$  GHz, contra  $f_r = 2,68$  GHz e  $LB_M = 2,55$  GHz (1,63 GHz – 4,179 GHz), com a diferença de 4,85% entre os resultados medido e simulado, cobrindo 27 canais indicados pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B. As diferenças entre os resultados medidos e simulados podem estar associadas ao método de construção, que foi o derretimento por percloroeto de ferro, ou pela característica da placa de FR4, que por ser baixo custo, não apresenta permissividade homogênea em toda sua estrutura.

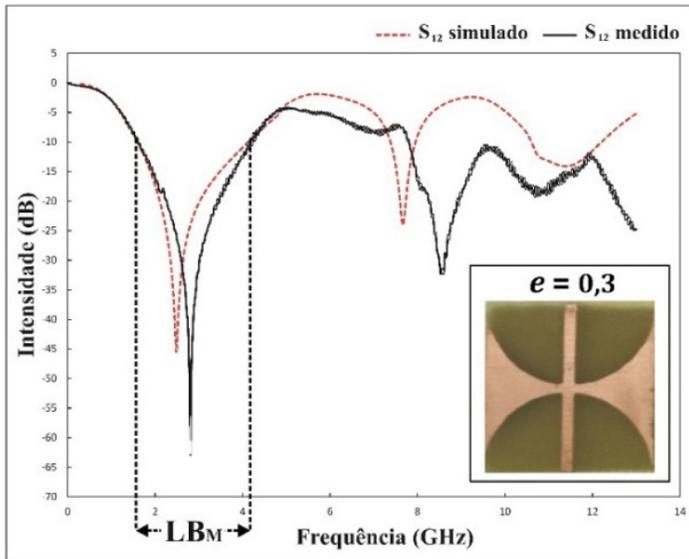


Figura 7 - Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) simulado e medido do filtro elíptico com  $e = 0,3$ .

Na Figura 8 pode ser visualizado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão, parâmetro  $S_{21}$ , do filtro com excentricidade  $e = 0,6$ , e parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 8,800$  mm. A largura de banda do filtro simulado é  $LB_S = 3,10$  GHz, com resultado medido de  $LB_M = 3,28$  GHz, a diferença de 5,49% na largura de banda, é esperada, visto que os protótipos, geralmente, apresentam valores de largura de banda medidos superiores aos simulados, com causa provável da variação da permissividade dielétrica do material. Pelos resultados pode-se observar uma variação entre a frequência de ressonância projetada, indicados na Tabela 1 de  $f_r = 3,54$  GHz, e medida de  $f_r = 4.27$  GHz, observada na Figura 8, de 20,62%, menor valor de perda de retorno no filtro medido, o que não foi observado no filtro com  $e = 0,3$ , e largura de banda cobrindo os canais indicados pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B.

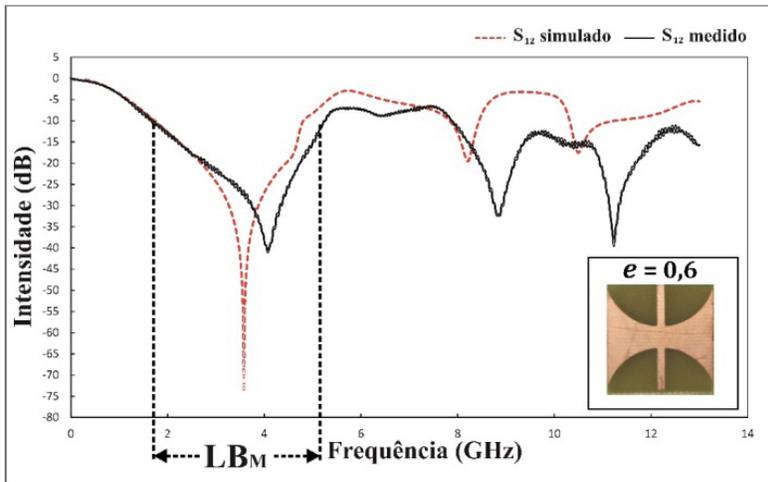


Figura 8 – Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) simulado e medido do filtro elíptico com  $e = 0,6$ .

Na Figura 9 pode ser visualizado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão, parâmetro  $S_{21}$ , do filtro com excentricidade  $e = 0,9$ , com os parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 4,795$  mm. Como observado para o filtro simulado não houve ressonância nas frequências propostas, indicando a rejeição da banda de frequências. O filtro medido apresentou pequena perda de retorno nas frequências indicadas, com de  $LB_M = 2,40$  GHz, e frequência de ressonância de  $f_r = 3,33$  GHz, porém isto pode ser atribuído às características dielétricas do material, que podem ter valor da tangente de perdas diferente do filtro simulado. O que pode ser observado é a rejeição da banda de frequências com a acentuação de frequências na faixa de 8 GHz.

Uma consideração sobre os filtros com geometria elíptica aplicadas ao projeto é que a variação da excentricidade tem efeito direto sobre a largura de banda, frequência de ressonância e na perda de retorno. Assim o filtro com  $e = 0,3$  medido obteve melhor perda de retorno que o filtro simulado com largura de banda próximas, porém o filtro medido com  $e = 0,6$  obteve maior largura de banda e menor perda de retorno que o filtro com  $e = 0,3$ , e quando comparado com o filtro com  $e = 0,9$  pode-se observar a rejeição da banda de frequências indicando que a variação da excentricidade promove a variação nos parâmetros de transmissão do filtro, o que pode ser utilizado em aplicações diversas.

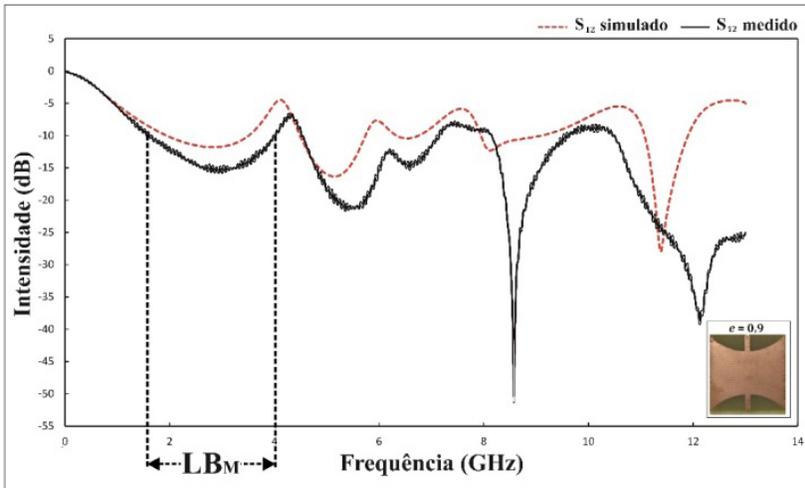


Figura 9 - Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) do filtro elíptico com  $e = 0,9$ .

## 5 | CONCLUSÃO

Neste artigo foram propostos filtros de microfita com geometrias elípticas, operando na banda ISM, de redes locais sem fio e cobrindo os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B, construídos em fibra de vidro, FR4, material de baixo custo. No desenvolvimento do projeto foram simulados e construídos três filtros com excentricidade de 0,3, 0,6 e 0,9, pelos resultados pode-se observar que a variação da excentricidade promoveu a variação da frequência de ressonância, largura de perda de retorno, e que o filtro com excentricidade de 0,9 apresentou rejeição nas bandas de frequência de operação dos filtros com valores de 0,3 e 0,6. Assim, pode-se observar a rejeição da banda de frequências indicando que a variação da excentricidade promove a variação nos parâmetros de transmissão do filtro, o que pode ser utilizado em aplicações diversas

## AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada (GEMCA), a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) pelo suporte técnico e laboratorial, a FAPEMA, a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA), a Universidade Federal de Campina Grande (UFPB), a FAPESQ-PB, e a Faculdade NetCom pelo financiamento para publicação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I. A. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 9<sup>th</sup>. New York: Dover, 1972.
- BALANIS, Constantine. *Antenna Theory Analysis and Design*. 4. Ed. New York: Wiley, 2016.
- BIGGS, M.; HENLEY, A.; CLARKSON, T. Occupancy Analysis of the 2.4GHz ISM Band. *IEEE Proceedings Communications*, vol. 151, 2004.
- CARL, B. B. *A History of Mathematics*. London: Wiley, 1968.
- CASIMIRO, A.; LOPES, V.; EMÍDIO, F. *Método dos Momentos*. Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade do Algarve, Algarve, Portugal, 2003.
- CHE, C. C.; KUO, J.; JIANG, M.; CHIN, A. Study of Parallel Coupled-Line Microstrip Filter in Broadband. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 48, 2006.
- CHEN, W. N.; WENG, M. H.; HUANG T. H., HUANG, T.; CHENG, C.; DAI, B. T.; Microstrip Coupled-Line Bandpass Filter With a Multilayer. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 39, 2003.
- CRNOJEVIC-BENGIM, V. *Advances in Multi-Band Microstrip Filters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- GOMEZ-GARCÍA, R., Gong X. Recent Trends on RF/Microwave Tunable Filter Design. *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 28-126, 2014.
- HONG, J. *Advances in Planar Filters Design*. London: SciTech Publishing, 2019.
- HONG, J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. 2<sup>nd</sup>. Hoboken: Wiley, 2011.
- KUMAR, L.; PARIHAR, M. S. Compact Hexagonal Shape Elliptical Low Pass Filter With Wide Stop Band, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, 2016.
- LIM, J. S.; KIM, C. S.; LEE, Y. T.; AHM, D.; NAUM, S., Design of Lowpass Filters Using Defected Ground Structure and Compensated Microstrip Line. *Electronics Letters*, vol. 38, 2002.
- MUNK, B. A. *Finite antenna arrays and FSS*. New York: Wiley, 2003
- PAARMANN, L. D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. London: Springer, 2001.
- PERNTECE JUNIOR, A. *Eletrônica Analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos, teoria, projetos, aplicações e laboratório*. 7<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- SATTHAMSAKUL, S., ANANTRASIRICHA, N., BENJANGKAPRASERT, C., WAKABAYASHI, T. Rectangular Patch Antenna with inset feed and modified ground-plane for wideband antenna, SICE Annual Conference 2008, 3400p.

SHENOI, B. A. Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design, John Wiley & Sons, 2005.

SILVA JUNIOR, P. F., SILVA FILHO, M. S. P. S. F., SANTANA, E. E. C., SILVA, P. H. F., OLIVEIRA, E. E. C. O., OLIVIERA, M. A., BATISTA, F. F., SERRES, A. J. R., FREIRE, R. C. S. F., NETO, A. S., NETO, S. A. A., CRUZ, C. A. M. *Fractal and Polar Microstrip Antennas and Arrays for Wireless Communications*. In: Mutamed Khatib. (Org.). *Wireless Mesh Networks - Security, Architectures and Protocols*. Krakow: IntechOpen, pp. 87-110, 2019

SILVA JUNIOR, P. F., FREIRE, R. C. S., SERRES, A. J. R., FREITAS SERRES, G. K., SOUSA, B. J. S., SILVA, P. H. F. Dual-Band Frequency Selective Surface with Angular Stability for WLAN Applications. In: *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, p. 377-381, 2017.

SILVA JÚNIOR, P. F., SILVA, P. H. DA F., SERRES, A. J. R., SILVA, J. C., FREIRE, R. C. S. Bio-inspired design of directional leaf-shaped printed monopole antennas for 4G 700 MHz band. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 1529-1533, 2016.

SILVA JUNIOR, P. F., FREIRE, R. C. S., SERRES, A. J. R., SILVA, P. H. F., SILVA, J. C. Wearable textile bioinspired antenna for 2G, 3G, and 4G systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 2818-2823, 2016

WEI, C. L.; JAI, B. F.; ZHU, Z. J.; Design of Triple-Mode Microstrip Filter with Source-Load Coupling. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 53, 2011.

WILLIAMS, B. A.; ARTHUR, B.; TAYLOR, F.; *Electronic Filter Design Handbook*. McGraw-Hill, 1995.

## TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS DE PODA URBANA

Data de aceite: 01/07/2021

Data da submissão: 05/05/2021

### **Eveline Trindade**

Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Tecnóloga em Biocombustíveis Palotina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/9285537563768617>

### **Maristela Furman**

Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Tecnóloga em Biocombustíveis Palotina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/3994970241992055>

### **Aline Bavaresco dos Santos**

Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Departamento de Engenharias e Exatas Palotina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/1098847351310417>

### **Dilcemara Cristina Zenatti**

Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Departamento de Engenharias e Exatas Palotina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/0797353142130104>

### **Adriana Ferla de Oliveira**

Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Departamento de Engenharias e Exatas Palotina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/8320953119053085>

**RESUMO:** A poda de árvores no meio urbano se torna algo fundamental para o bom desenvolvimento das mesmas, aproveitamento da parte aérea e para que não ocorra disputa entre elas e as redes de eletricidade. A poda urbana também se configura como um resíduo que pode ser um passivo ambiental se descartada inadequadamente ou pode ser utilizada como um energético, e a incrementação de energia pode ocorrer por meio da pirólise, produzindo um coproduto mais energético. Diante da importância do aproveitamento desse resíduo para energia este trabalho buscou caracterizar por teor de umidade e análise imediata o resíduo de poda urbana do município de Palotina – PR, antes e depois do processo de torrefação. A torrefação foi conduzida nas temperaturas de 240, 260 e 280 °C e nos tempos de 1, 2 e 3 h. A temperatura e o tempo foram significativos e influenciaram positivamente o aumento do teor de carbono fixo e para o material volátil apenas a temperatura teve efeito significativo, o aumento da temperatura influiu negativamente no percentual de material volátil. O teor médio de umidade foi elevado de 68,12 %. O ensaio 4 com temperatura de 280 °C e tempo de 3 h apresentou o maior teor de carbono fixo (63,13 %), menor teor de material volátil (32,74%) e rendimento gravimétrico (41 %), corroborando com os dados da literatura. Sendo assim, o resíduo de poda urbana pode quando submetido a torrefação tornar-se um coproduto de maior valor agregado e com características combustíveis mais interessantes e ainda minimizar os impactos ambientais do destino inadequado.

**PALAVRAS - CHAVE:** Biomassa. Coproduto.

**ABSTRACT:** The urban pruning waste becomes something fundamental for their good development, use of the aerial part and so that there is no dispute between them and the electricity networks. Urban pruning is also configured as a waste that can be an environmental liability if disposed of improperly or can be used as an energy source, and the increase in energy can occur through pyrolysis, producing a more energetic product. In view of the importance of using this waste for energy, this work sought to characterize the urban pruning waste in the Palotina – PR city, by moisture content and immediate analysis, before and after the torrefaction process. The torrefaction was carried out at temperatures of 240, 260 and 280 °C and at times of 1, 2 and 3 h. Temperature and time were significant and positively influenced the increase in the fixed carbon content and for the volatile material only the temperature had a significant effect, the increase in temperature negatively influences the percentage of volatile material. The average moisture content was high of 68.12 %. Test 4 with temperature of 280 °C and time of 3 h presented the highest content of fixed carbon (63.13 %), lowest content of volatile material (32.74 %) and gravimetric yield (41 %), corroborating with the literature data. Thus, urban pruning waste can, when subjected to torrefaction, become a co-product of greater added value and with more interesting fuel characteristics and still minimize the environmental impacts of the inadequate destination.

**KEYWORDS:** Biomass. Co-product. Pyrolysis. Torrefaction. Energy.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os resíduos de poda são considerados grande parte dos resíduos gerados por uma cidade. Quando as implantações dos sistemas elétricos de distribuições e de arborizações são planejadas de formas independentes geram transtorno para os órgãos municipais, resultando disputas entre árvores e as redes de distribuição pelo mesmo espaço físico (CORTEZ et. al, 2008).

Para o bom desenvolvimento das árvores em espaços urbano a poda e a remoção são métodos essenciais, para que não ocorram problemas com o uso das vias públicas e o espaço aéreo das cidades (NOLASCO; MEIRA; GATTI, 2013).

Segundo Silva; Renofio e Margutti (2016), os resíduos de poda urbana na maioria das vezes são descartados em aterros, que ocasionam sérios problemas como de compactação, o material ocupa maior volume, consumindo espaço útil do aterro, reduzindo sua capacidade e ampliando seus custos operacionais.

De acordo com Angelis et. al (2007) estes resíduos ainda têm sua utilização e reciclagem pouco praticada, mas com novas tecnologias que vem surgindo, esse quadro está mudando. Vários meios de se reutilizar e reciclar esses resíduos estão sendo utilizados.

A torrefação é um tratamento térmico da biomassa que produz um combustível com melhores características energéticas (RODRIGUES, 2009). Vidal e Hora (2011) relatam que “a torrefação é semelhante à pirólise, que produz o carvão vegetal, de modo que a madeira torrificada é um produto intermediário entre madeira seca e carvão vegetal” os mesmos

autores descrevem que a torrefação muda as propriedades da biomassa volatilizando a hemicelulose, e a massa resultando em um material hidrofóbico.

Diante do exposto o presente trabalho buscou caracterizar por teor de umidade e análise imediata e o resíduo de poda urbana do município de Palotina – PR, antes e depois do processo de torrefação.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

De forma aleatória sem distinção de espécie ou origem do material, do monte de cavacos foram coletados 3 sacos de aproximadamente 2 kg que foram misturados e homogeneizados para produção de uma amostra composta de 1 kg.

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina. A umidade do cavaco foi determinada pela norma TAPPI T-264 om-88. Em seguida o material foi seco em estufa a 105 °C e moído em moinho tipo Willey e selecionado em conjunto de peneiras 40/60mesh para realização da análise imediata seguindo a normativa ASTM D-3172 até D-3175 (ASTM, 1983) em duplicata, onde determinou-se os teores de carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ). O rendimento gravimétrico foi calculado segundo Protásio et al. (2012).

A torrefação do cavaco foi realizada em forno mufla segundo metodologia adaptada de ARIAS et al. 2007, o delineamento experimental é apresentado na Tabela 1.

Para a análise dos resultados obtidos no processo de torrefação dos cavacos de podas de árvores, utilizou-se um planejamento fatorial 2<sup>1</sup>, em que foram consideradas variáveis independentes a temperatura (T (°C)) e o tempo (t(h)) de torrefação, cujos níveis são apresentados na Tabela 2.

Fatores Experimentais	Variáveis codificadas		
	-1	0	+1
T °C	240	260	280
t (h)	1	2	3

Tabela 1. Fatores experimentais e variáveis codificadas do delineamento.

Ensaio	T °C	t(h)
1	240	1
2	280	1
3	240	3
4	280	3
5	260	2
6	260	2
7	260	2

Tabela 2. Planejamento fatorial.

Os resultados estatísticos foram obtidos utilizando-se o software STATISTICA™ (versão 8.0 da Star Soft, Inc).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo o responsável pela empresa terceirizada que realiza o serviço, as árvores podadas no município são: sibipiruna, mangueira, canelinha, grevilha, ipê branco entre outras.

Os resultados encontrados para o teor de umidade e análise imediata são apresentados na Tabela 3 juntamente com dados da literatura. Verifica-se que a umidade varia, uma vez que esta depende do tempo de picagem, estocagem, espécies etc, O trabalho de Petricoski et al (2020) apresenta o teor de umidade mais baixo, uma vez que são briquetes produzidos a partir de podas urbanas e para a compactação é exigido teor de umidade reduzido de 8 a 12 %. No entanto, a briquetagem não altera as propriedades químicas do material sendo observados os teores de CF, MV e CZ semelhantes aos demais autores.

	Este trabalho	Souza, Alencar Mazonetto (2016)	Martins (2013)	Mazonetto et al (2012)	Petricoski et al (2020)
U (%)	68,12	36,62	20,99	60,30	8,80
CF	15,97	16,44		11,17	20,23
MV	82,09	75,36		82,37	70,95
CZ	1,94	8,19		6,46	8,25

Tabela 3. Resultados para umidade (U) e Análise Imediata (CF, MV, CZ) para poda urbana.

O material que passou pelo processo de torrefação foi submetido a análise imediata. A Tabela 4 apresenta a matriz do planejamento, com as variáveis nas suas formas codificadas e reais, e os resultados obtidos para carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e rendimento gravimétrico (RG).

Segundo Rodrigues (2009), este tratamento térmico conduz a padronização das características físico-químicas e mecânicas do material, assim concentrando a energia disponível em um novo produto, com perda de massa limitada.

Para cada combinação de temperatura e tempo de processamento, pode-se obter produtos de diferentes propriedades que podem ser reproduzidos com alta precisão. A densidade energética e os teores de carbono fixo aumentam quando são incrementados os parâmetros de temperatura e tempo, como pode ser observado nos resultados obtidos. O rendimento decresce com o aumento da temperatura como observado nos ensaios 2 e 4 e o poder calorífico aumenta, embora neste trabalho não tenha sido determinado (FELFLI;

Ensaio	T (°C)	t(h)	CF (%)	MV (%)	CZ (%)	RG (%)
1	-1 (240)	-1 (1)	52,18	43,66	4,15	51
2	1 (280)	-1 (1)	56,76	38,46	4,78	44
3	-1 (240)	1 (3)	54,43	40,97	4,61	49
4	1 (280)	1 (3)	63,13	32,74	4,13	41
5	0 (260)	0 (2)	55,67	39,51	4,82	49
6	0 (260)	0 (2)	54,41	41,40	4,18	46
7	0 (260)	0 (2)	54,04	41,57	4,40	46

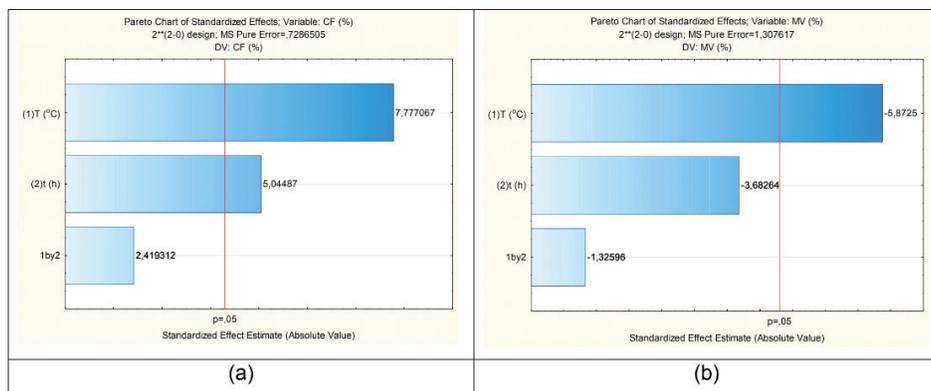
Tabela 4. Resultados para CF, MV, CZ e RG.

Realizou-se análise estatística do experimento usando a matriz do planejamento da Tabela 2. Os ensaios 5,6 e 7 são replicatas realizadas no ponto central do experimento, com intuito de verificar a reprodutibilidade e o erro experimental.

O ensaio 4 com temperatura de 280 °C e tempo de 3 h apresentou o maior teor de carbono fixo (63,13 %), menor teor de material volátil (32,74%) e rendimento gravimétrico (41 %), corroborando com os dados da literatura.

A temperatura e o tempo foram significativos e influenciaram positivamente o aumento do teor de carbono fixo, ou seja, aumentando a temperatura e o tempo aumenta-se o teor de carbono fixo. Para o material volátil apenas a temperatura teve efeito significativo, sendo um efeito negativo, ou seja, o aumento da temperatura influi negativamente no percentual de material volátil. Para as variáveis cinzas e rendimento gravimétrico não observou-se efeito significativo da temperatura e do tempo.

Os resultados do efeito da temperatura e tempo sob as variáveis resposta CF, MV, CZ e RG pode ser observado nos Diagramas de Pareto apresentados na Figura 1.



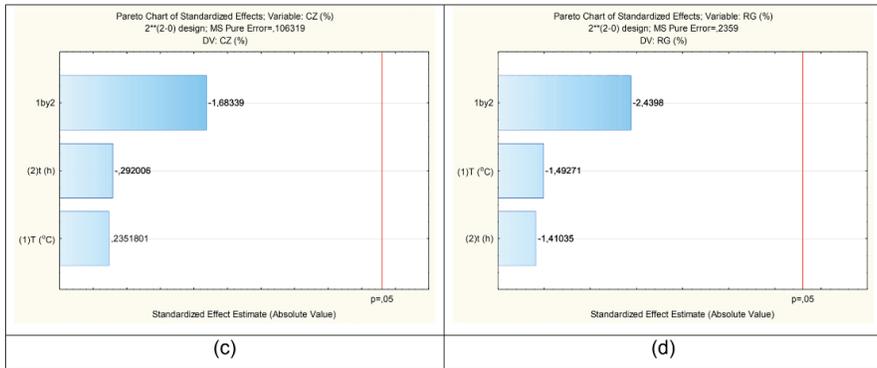


Figura 1. Diagrama de Pareto para carbono fixo (a), material volátil (b), cinzas (c) e rendimento gravimétrico (d).

Combinação temperatura (T) tempo (t)		
Modelo de Regressão	R <sup>2</sup>	F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>
CF(%) = 55,80 + 3,32 T + 2,15 t	0,90	1,50
MV (%) = 39,76 – 3,36 T	0,88	1,19

Tabela 5. Modelos de regressão linear com coeficiente de determinação R<sup>2</sup> e teste F ( $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$ )

Na Figura 2 são apresentados os gráficos de superfície de resposta para ilustrar o efeito das variáveis independentes; temperatura e tempo; no comportamento do processo.

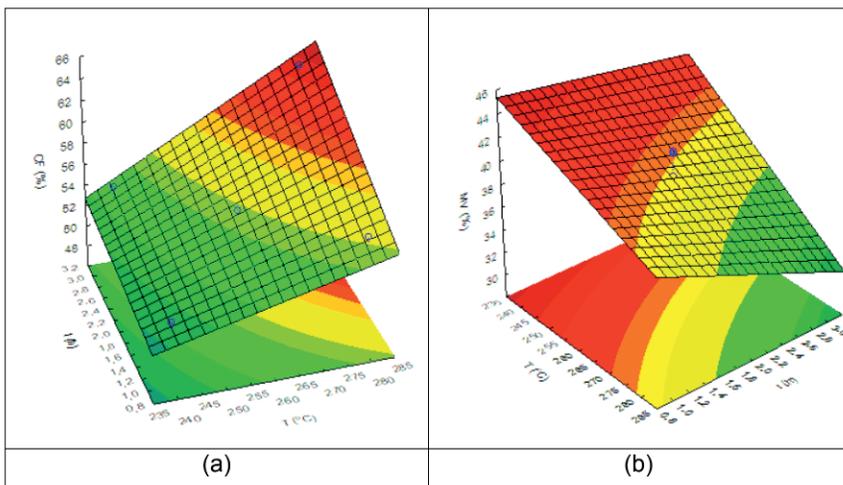


Figura 2. Superfície de resposta para carbono fixo (a) e material volátil (b)

## 4 | CONCLUSÕES

A umidade elevada de 68,12 % pode estar associada ao tempo que o material estava sendo seco no ambiente e ao fato do armazenamento do material ser a céu aberto. A temperatura e o tempo contribuem positivamente para o incremento do teor de carbono fixo e a temperatura contribui negativamente para a diminuição do teor de material volátil. A torrefação apresenta-se como uma boa alternativa para agregar valor ao resíduo da poda urbana, transformando-o em um coproduto mais interessante energeticamente.

## REFERÊNCIAS

- ANGELIS, B. L. D.; SAMPAIO, A. C. F.; TUDINI, O. G.; ASSUNÇÃO, M. G. T.; NETO, G. de A. **Avaliação das árvores de vias públicas da zona central de Maringá, estado do Paraná: estimativa de produção de resíduos e destinação final.** Acta Sci. Agron. Maringá, v 29, n.1, p. 133-140, 2007.
- ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSE, J.; PLAZA, M. G.; RUBIERA, F.; PIS, J. J. **Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass.** Fuel Processing Technology v.89 p.169 – 175. 2007.
- CORTEZ, C. L.; GRISOLI, R.; GAVIOLI, F.; COELHO, S. T.; CARMELO, S. **Alternativa sustentável para utilização de resíduos de poda provenientes da manutenção das redes de distribuição de energia elétrica.** 2008. Disponível em: <http://143.107.4.241/download/publicacoes/podaagrener04jun2008.pdf> Acesso em: 24/11/2016.
- FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. **Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas.** 2003. An. 3. Enc. Energ. Meio Rural.
- MARTINS, C. H. **O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 8(2), 257-267. 2013.
- MAZZONETTO, A. W.; VISSOTTO, J. P.; NEVES, R. C.; SÁNCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. C. **Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia.** CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2012. São Luís 2012.
- NOLASCO, A. M.; MEIRA, A. M.; GATTI, R. C. **Capacitação de gestores públicos em gerenciamento de resíduos da arborização urbana.** Revista de Cultura e Extensão USP, v. 9, p. 65-73, 2013.
- PETRICOSKI, S. M.; FEIDEN, A.; FERLA-OLIVEIRA, A.; TOKURA, L. K.; SIQUEIRA, J. A. C.; BONASSA, G.; ZILLI, B. M.; GENTELINI-MARQUEZ, D. P.; SOUZA, S.N.M.; FEIDEN, C. A.; FEIDEN, E. A.; MARTINEZ, A. S.; **Briquettes Produced With a Mixture of Urban Pruning Waste, Glycerin and Cassava Processing Residue.** Journal of Agricultural Science; Vol. 12, No. 6; 2020.
- PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. **Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, set. 2012.
- RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos.** 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, M. J. D.; RENOFIO, T. C. Z.; MARGUTTI, M. C. **A Reutilização dos Resíduos das Podas de Árvores e o Levantamento Regional dos tipos de Árvores.** 2016. Disponível em: <[http://web-resol.org/textos/2009-levantamento\\_regional\\_manuel.pdf](http://web-resol.org/textos/2009-levantamento_regional_manuel.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2016.

SOUZA, N. R. D.; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. **Potencial energético do resíduo das podas de árvores no município de Piracicaba – SP.** Energ. Agric., Botucatu, vol. 31, n.3, p.237-245, julho-setembro, 2016.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia.** BNDES Setorial, n. 33, mar. 2011, p. 261-314, 2011.

## SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM EMPRESAS TERCEIRIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

*Data de aceite: 01/07/2021*

**Anderson Francisco Kaiser**

**Marcos Hister Pereira Gomes**

**RESUMO:** O Objetivo do estudo foi identificar as condições de segurança do trabalho em serviços terceirizados prestados por uma Cooperativa de Trabalho em instalações elétricas para empreiteiras na construção civil, tendo-se como foco as diretrizes de Segurança do Trabalho aplicadas ao Canteiro de obras na cidade de Videira no estado de Santa Catarina, em uma pesquisa de campo apresentada por meio de estatísticas. Os resultados demonstraram que nos processos produtivos em construção civil, especialmente os que se direcionam ao espaço do canteiro de obras, são exigidos, o máximo possível de conformidade de modo que as construtoras preferem contratar empresas idôneas que mantenham conformidade com a legislação e segurança do trabalho para terceirizar algumas atividades, como a instalação elétrica em canteiros de obras que tem sido um nicho para as cooperativas de trabalho com a expansão da legislação que trouxe flexibilidade para a realidade de atividades que podem ser realizadas por profissionais de qualificação técnica.

**PALAVRAS - CHAVE:** Construção Civil. Canteiro de Obras. Cooperativa. Terceirizados.

**ABSTRACT:** The objective of the study was to identify the conditions of work safety in outsourced services provided by a Work Cooperative in electrical installations for contractors in civil construction, focusing on the Work Safety guidelines applied to the Construction Site in the city of Videira in the state of Santa Catarina, in a field research presented by means of statistics. The results showed that in the production processes in civil construction, especially those directed to the space of the construction site, the maximum possible compliance is required so that the construction companies prefer to hire suitable companies that maintain compliance with the legislation and work safety. to outsource some activities, such as the electrical installation on construction sites that has been a niche for work cooperatives with the expansion of legislation that has brought flexibility to the reality of activities that can be performed by professionals with technical qualifications.

**KEYWORDS:** Construction. Construction site. Cooperative. Outsourced.

### 1 | INTRODUÇÃO

O objetivo do estudo foi identificar as condições de segurança do trabalho em serviços terceirizados prestados por uma Cooperativa de Trabalho em instalações elétricas para empreiteiras na construção civil, tendo-se como foco as diretrizes de Segurança do Trabalho aplicadas ao canteiro de obras na cidade de Videira em Santa Catarina.

As Cooperativas de Trabalho que

realizam serviços terceirizados para empreiteiras executam um número elevado de diferentes tipos de atividades as quais exigem a partir dos riscos regulatórios, a aplicação de medidas de segurança (FERRAZ, 2016)

A NR 10 como norma de segurança trouxe imensas contribuições no campo da segurança em todos os setores de produção, considerando-se o uso de eletricidade em instalações provisórias é uma ação realizada em muitas atividades realizadas por empresas terceirizadas. As diretrizes contidas favorecem a promoção de meios para evitar acidentes e os indicativos de proteção em relação ao uso de roupas de proteção contra eletricidade, o uso de orientações da NR 10 na efetivação de um trabalho seguro ao executar as atividades de instalação elétrica provisória em canteiros de obras (BRASIL, 1978)

Simão de Melo (2018) avalia que grande parte dos acidentes de trabalho por negligência se relacionam às empresas terceirizadas, em face de sua expansão no mercado, somente no ano de 2013, existia um trabalhador terceirizado em relação a cinco trabalhadores, atualmente são três trabalhadores terceirizados para cada cinco trabalhadores efetivos.

A expansão das atividades terceirizadas no Brasil evoluiu também para um aumento drástico dos acidentes de trabalho no Brasil. As empresas que prestam serviços terceirizados têm sido expressamente denunciadas pelas negligências no campo da segurança do trabalho, tanto em relação aos empregados que prestamos serviços como pela carência de instrução normativa em serviços prestados para as tomadoras (KRUEGER, 2014).

Justifica-se a escolha do tema com base no pressuposto de que a terceirização tem se constituído em uma forma de precarização do trabalho, especialmente no que se refere ao direito de Saúde e Segurança do Trabalho, o que tem gerado as condições propícias para a ocorrência de acidentes ocupacionais em face de situações de redução de custos.

A importância acadêmica do tema é trazer uma contribuição acerca da atividade das cooperativas de trabalho no mercado terceirizado como coadjuvante das atividades da construção civil, a partir da visão da segurança do trabalho, tendo-se como base de análise a norma NR 10 como alicerce do trabalho em termos de comparação e conformidade entre o que a empresa terceirizada da pesquisa realiza e a norma de segurança em instalações elétricas provisórias e a NR 18 que trata de orientações sobre canteiros de obras.

De modo que se tem como foco as diretrizes da NR 18 que trata do planejamento e da organização do canteiro de obras, dentro do contexto das execuções das instalações elétricas temporárias e definidas pela NR 10, que trata da Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.

A criação da norma estabeleceu as orientações de como executar o processo de desenergização ou travamento de situações em que há a ocorrência de evento de risco, esses conhecimentos e técnicas foram muito importantes para todas as categorias industriais produzindo uma melhoria necessária, diante do avanço das inovações tecnológicas (MATTOS, 2010).

Atualmente o uso da NR 10 se faz necessária em todas as inovações no campo de instalações elétricas (relés) que avançaram para novos tipos de projetos que passaram a exigir um grau de eficácia em segurança elétrica em subestações e em instalações elétricas (processos de desenergização), instalações provisórias nos campos de aplicação em segurança de projetos na segurança em construção, montagem, operações e manutenções, proteção de incêndios e explosão, etc, possibilitando às empresas terceirizadas a aplicação e medidas de segurança através de ações em conformidades com a norma (MATTOS, 2010).

Nesse aspecto, a problemática do estudo apresenta a seguinte questão: Quais as condições de segurança do trabalho em serviços terceirizados prestados por uma Cooperativa de Trabalho em instalações elétricas na construção civil?

Para responder a essa questão optou-se por realizar uma pesquisa de campo, de cunho quantitativa com a finalidade de analisar as diretrizes do trabalho da empresa terceirizada e sua conformidades em relação à segurança de instalações elétricas e à execução do projeto conforme o modelo do canteiro de obras. Tendo-se como público alvo, os gestores e profissionais que atuam nesse ramo de atividade.

A terceirização em rotinas de trabalho na construção civil é uma realidade concretizada há décadas, considerando-se que o contrato civil usado em prestação e serviços está previsto no Código Civil de 1916 e mantido atualmente ganhou mais expressividade com a reforma trabalhista recente que expandiu as formas de contratações nas relações de trabalho. De modo que na modalidade de terceirização, não existe ausência de responsabilidades com segurança do trabalho (SALATIEL, 2015).

Segundo Salatiel (2015), a construção civil necessita de prestação de serviços gerais:

Na fase de operação – é necessário o atendimento dos requisitos do método de construção a partir do esforço de ampliação dos meios e recursos para a construção, a partir do controle sobre a lista de recursos completa para que seja possível a realização de síntese do trabalho como estratégia da empresa construtora, para se beneficiar de controle de recursos tecnológicos, humanos, materiais e financeiros. Em nível de processos - atualmente, nenhuma rede em produção poderá funcionar bem sem um sistema adequado de gerenciamento de obras. A complexidade das operações deverá ser planejada conforme os custos de operação e manutenção da qualidade em todas as etapas da construção civil fazem com que o investimento em gerenciamento seja prioritário para o oferecimento adequado de gerência.

Na prestação de serviços da construção civil todas as decisões devem estar pautadas em contratos específicos amparados por lei, onde se estabelecem os direitos e obrigações dos contratantes e da empresa contratada. De maneira que o contrato na prestação de serviços representa a relação adequada que deverá garantir a segurança jurídica no ciclo operacional do empreendimento para todas as partes envolvidas (MATTOS, 2010).

De acordo com a Lei nº 13.429/2017, a responsabilidade de procedimentos saúde,

segurança e higiene do trabalho deve estar sob a responsabilidade da contratante nos casos em que o trabalho for realizado em suas dependências. Portanto, se trata de uma obrigatoriedade prevista em contrato (FERNANDES DA SILVA, 2017).

Em relação à questão da responsabilidade civil, foi determinado na reforma de 2017 que trata da terceirização que a empresa tomadora tem a responsabilidade de aprimorar e desenvolver um ambiente salubre para receber os trabalhadores da prestadora de serviços, caso, se as atividades forem e realizadas dentro de sua localidade de trabalho (KRUEGER, 2014, p. 23).

Para o entendimento jurídico referente à modalidade de economia com base em contratação terceirizada na economia, é necessário compreender a diferença entre atividade meio e atividade fim, para que possa discutir os pontos essenciais para substanciar a proteção dos direitos trabalhistas.

Nesse aspecto, é relevante diferenciar esses dois tipos de atividades que integram o ciclo produtivo de empresas públicas e privadas. A partir dessa noção é que o direito do trabalho determina a licitude ou ilicitude nas diretrizes do trabalho terceirizado, bem como as obrigações trabalhistas do tomador de serviços (FERRAZ, 2016).

Conforme o entendimento da súmula 331 editada pelo TST, os casos que podem ser julgados como terceirização ilícita, mesmo que reconhecida a existência do vínculo trabalhista diretamente com o tomador que tem a responsabilidade sobre as obrigações trabalhistas resultantes da contratação ilícita de trabalhadores terceirizados (SALATIEL, 2015).

Deve-se considerar, no entanto, que é preciso reconhecer a distinção entre tais atividades que podem ou não ser terceirizadas de acordo com a legislação pertinente ao trabalho terceirizado e as empresas mistas, públicas e privadas.

Salatiel (2015) analisa que na medida em que a definição de atividade-fim e atividade-meio, não se constitui em nível jurídico de terminologias aplicadas ao direito do trabalho ou delas oriundas, mas das condições das operações flexibilizadas da produção através da modalidade de terceirização.

Define-se como atividade-fim todas as tarefas ou funções de cunho empresarial referentes ao trabalho que tem como foco o núcleo da produção, a atividade da qual existe uma qualificação empresarial para desenvolvê-la, exigindo um contexto de atividade fundamental para o tomador de serviço (FERNANDES DA SILVA, 2017).

No que concerne à definição de atividade-meio incorrerá na terceirização em uma tipologia de atividade que não e apresenta como núcleo principal da atividade empresarial e como tal, poderá ser terceirizada para outra empresa especialista. Portanto, tais atividades não fazem parte da composição principal da ação empresarial, sendo consideradas funções periféricas e cabíveis de terceirização (KRUEGER, 2014).

No âmbito do direito civil e empresarial os termos são mais utilizados e existe uma maior preocupação em sua definição corrente. No direito civil, faz-se um comparativo

entre os dois tipos de atividades meio e fim e as atribuições de efeito e de meio do direito obrigacional.

No entendimento do TRT da 4ª Região, a aplicação dos termos em nível de ordenamento jurídico se direciona aos subsídios do Direito Civil que determinar que atividade-fim e atividade-meio deverá se remeter a uma distinção clara que se conduz à interpretação da atividade-fim como função principal e as atividades-meio como funções secundárias ao objetivo da empresa (LOPES DA SILVA, 2015).

No entendimento do Direito Empresarial, existe o exame do contrato social referente às obrigações da pessoa jurídica a partir do enquadramento no marco ao objetivo-fim das atividades desenvolvidas pelas empresas.

Lopes da Silva (2015) analisam que os termos atividade-fim e atividade-meio surgem no cenário do direito civil e empresarial, mas não apresentam uma definição clara e concisa suficientemente para nutrir o fim das dúvidas existentes sobre o tema.

Os legisladores e demais membros dos tribunais de jurisdição e inclusive aceita pela entidade máxima, o Tribunal de Contas da União que recomenda à Administração Pública, a limitar o processo de terceirização apenas restritamente às atividades-meio.

Na visão Fernandes da Silva (2017, p. 87), existe uma grande fragilidade nos termos atividade-meio e atividade-fim:

A expressão atividade-meio, incerta na Súmula 331 do TST, tem grande importância para a exegese dessa súmula, pois demarca o limite entre as terceirizações lícitas e as ilícitas. O tomador de serviços responderá de forma subsidiária pelos encargos do contrato na terceirização lícita. A terceirização na atividade-fim é ilícita, constituindo vínculo empregatício direto com o tomador.

Nesse contexto, atualmente se conjecturam diversas polêmicas referentes à legalidade da terceirização em face da discrepância que evidenciam atualmente nos tribunais pela carência de diretrizes claras e específicas para solucionar os problemas trabalhistas referentes à terceirização.

Fernandes da Silva (2017) analisa que muitas empresas prestadoras de serviços, especialmente as de pequeno porte, necessitam de reduzir custos e terminam por fazer cortes exatamente na área de segurança do trabalho.

A categoria de serviço pode ser entendida como uma forma de transação comercial caracterizada quando um tomador de serviço (cliente) e um prestador de serviços (empresa contratada) realizam um contrato de serviços. Em cada categoria de serviços se encontram diversos particulares que geralmente decorrem de produção e consumos que se fazem simultâneos (QUALHARINI, 2017).

O setor de construção civil depende de mão de obra de caráter especializado que possa oferecer um serviço de qualidade em todas as obras realizadas. Mas esse tipo de mão de obra ainda é considerada escassa no mercado, o que tem representado a necessidade

das empreiteiras de realizar várias tarefas e algumas a optar pela terceirização quanto à prestação de serviços na construção civil, pois são empresas de serviços que oferecem serviços especializados mais comuns e específicos na área de hidráulica, serviços elétricos e de alvenaria, pinturas, etc (VELOSO NETO, 2013).

As cooperativas de trabalho têm como doutrina manter os laços sociais do cooperativismo, o qual traz como fundamento a colaboração, a partir da associação de trabalhadores com as mesmas perspectivas e interesses, com a finalidade de angariar vantagens em atividades econômicas que se baseiam em valores de ajuda mútua e responsabilidade, democracia, igualdade, equidade e solidariedade (QUALHARINI, 2017).

Na tradição dos seus fundadores, os membros das cooperativas acreditam nos valores éticos da honestidade, transparência, responsabilidade social e preocupação pelo seu semelhante.

Tipos de cooperativas	Atividades
<b>Cooperativas de consumo</b>	▶ São empresas de propriedade dos próprios clientes e representam alternativas concretas para a compra de bens e serviços a preços acessíveis, na medida em que estas organizações não visam lucro.
<b>Cooperativas de comercialização</b>	▶ São organizações formadas por pequenos e médios agricultores, artesãos, coletores de produtos recicláveis, etc, que vendem a produção de seus sócios e compram para eles equipamentos, matérias primas e até mantimentos.
<b>Cooperativas de produção</b>	▶ São empresas de produção coletiva, agropecuária, industrial ou de serviços.
<b>Cooperativas de "Trabalho" ou de "Serviços"</b>	▶ Atuam hoje no Brasil na manutenção de redes elétricas e de telefonia, manutenção e limpeza de edifícios, hospitais, mão de obra para colheitas, para confecção de vestuário, calçados, escolas, etc.
<b>Cooperativas de Crédito</b>	▶ As cooperativas são sociedades civis, compostas por pessoas, com forma e natureza jurídica próprias, sem fins lucrativos e não sujeitas à falência. Adicionalmente, as cooperativas de crédito são instituições financeiras integrantes do Sistema Financeiro Nacional (SFN).

Quadro 1 – Os tipos de cooperativas

Fonte: Krueger (2014)

O associativismo é um modelo fundamental nas cooperativas, pois trata-se de um fundamento base para manter um sentimento mútuo de responsabilidade, a fim de buscar uma situação que venha a beneficiar a todos (KRUEGER, 2014).

Ferraz (2016, p. 56) avalia que:

A terceirização no caso das cooperativas, com a nova lei da reforma trabalhista, acontecendo tal situação na prática, deixa de valer o instituto e volta a incidir a legislação trabalhista sobre a relação de emprego existente. E a união dos dois institutos, ou seja, da cooperativa de trabalho e da terceirização pode ser um instrumento válido de flexibilização da legislação trabalhista sem retirar os direitos fundamentais dos trabalhadores e sem jogá-los para a informalidade. Na verdade, como a cooperativa de trabalho tem por escopo, justamente, a inexistência de uma subordinação e de uma interferência de um empregador será um empreendimento que poderá realizar a terceirização de

forma mais correta e repassando diretamente o produto, o lucro, da prestação de serviços ao cooperativado, ao indivíduo, sem precisar deixar parte para terceiro, o patrão.

Nessa conjuntura, Ferraz (2016) considera as vantagens da flexibilização trazida pela terceirização para as cooperativas de trabalho especialmente as coadjuvantes da expansão da economia no setor da construção civil.

## 2 | ESTUDO DE CASO

A Cooperativa de Trabalho do foco da pesquisa está no mercado há cerca de 11 anos, tendo sido criada por 18 associados em fevereiro de 2009 na cidade de Videira em Santa Catarina.

A criação da cooperativa foi um projeto voltado para angariar serviços para vários trabalhadores profissionais em instalações elétricas em canteiros e em alvenarias.

Atualmente a cooperativa conta com 54 associados que fazem serviços diversificados (pinturas, consertos hidráulicos e instalações elétricas), especialmente contratada como terceirizada por construtoras.

Os serviços mais predominantes são de instalações elétricas na fase de execução de canteiros de obras e na fase intermediária de finalização a obra, a partir da execução de todo o projeto elétrico do empreendimento.

Os associados da cooperativa passam por treinamentos a cada seis meses em instalações e serviços em eletricidade com base nas diretrizes da NR 10, bem como, a NR 18 que determina as orientações sobre a execução do canteiro de obra. A associação teve como prioridade estabelecer a qualificação profissional técnica.

A preocupação com aspectos de segurança do trabalho se reflete na autorização necessária que o trabalhador possa desenvolver alguns tipos de rotinas de instalações mais perigosas que exigem um conhecimento técnico mais apurado, se por acaso o cooperado entrar como associado e não houver realizado o treinamento, estará disponível apenas quando realizá-lo.

O supervisor é um profissional qualificado que atua em conjunto com as equipes de serviços, tendo como finalidade orientar as atividades e monitorar o devido uso de equipamentos de proteção individual e coletivo.

A filosofia da empresa é prezar pelas seguintes diretrizes:

No contexto da responsabilidade das empresas pela saúde e segurança do trabalho a partir da supervisão, pois fora do ambiente e dentro do espaço do tomador, cabe a ele tomar as devidas precauções.

O artigo 157 da Consolidação das Leis do Trabalho - CLT determina as atribuições às empresas em geral, o que a empresas se propõe a fazer como prestadora de serviços.:

Cumprir e fazer cumprir as normas de segurança e medicina do trabalho;

Instruir os associados, através de ordens de serviço, quanto às precauções a tomar no sentido de evitar acidentes do trabalho ou doenças ocupacionais;

Adotar as medidas que lhe sejam determinadas pelo órgão regional competente;

Facilitar o exercício da fiscalização pela autoridade competente.

Nesse contexto, dentro do contexto das obrigações, a responsabilidade penal também é apontada como resultante de negligência empresarial nos casos de acidentes de trabalho. Nesse contexto, a direito brasileiro entra na esfera da responsabilidade civil na prestação de serviços terceirizada, nos casos em que o tomador do serviço (se for em sua localidade), no caso dos canteiros de obras, a responsabilidade é das empresas de construção civil de assegurar os equipamentos de proteção do trabalho com energia elétrica.

Os associados são chamados a fazer um treinamento básico em segurança em instalações e serviços com eletricidade, contendo cerca de 40 horas/aulas, com completo material didático e aulas em slides com as diretrizes da NR 10 e BR 18.

Os associados mais experientes com mais tempo de serviço recebem um treinamento especializado em instalações elétricas energizadas para trabalhar em alta tensão. Além de realizarem o curso básico, ainda avançam para um outro curso complementar que treina especificamente para segurança no Sistema Elétrico de Potência, conforme menciona as diretrizes da NR-10.

O ambiente da pesquisa ocorreu em um canteiro de obras, a partir da seguinte caracterização: a base foi construída a partir de tapumes de madeira e de material metálico, seguindo as diretrizes da NR18, com capacidade máxima para 32 pessoas e área total (instalações e área a ser construída) de 771,42m<sup>2</sup>.

Em termos de instalações foi planejado um espaço de 202,75m<sup>2</sup>, a partir da seguinte divisão de ambientes: vestuário e almoxarifado (74,36m<sup>2</sup>), refeitório (25,77m<sup>2</sup>), a área do escritório de 25,70m<sup>2</sup>), área destinada a procedimentos de armação e formas: 73,97m<sup>2</sup> e casa de vigia ou guarita 2,95m<sup>2</sup>.

Fazia parte integrante do canteiro de obras, além dos pedreiros e demais profissionais de execução de tarefas, o engenheiro de obras, o engenheiro civil especializado em layout, o Comitê de Qualidade, profissionais da administrativa de canteiro de obras e da gerência técnica para fiscalizar a conformidade das normas de segurança.

O diagrama da figura 1 demonstra que foi elaborado um modelo de layout para a obra, embora tenha havido mudanças durante o plano que modificaram muitos dos elementos contidos nesta planta.

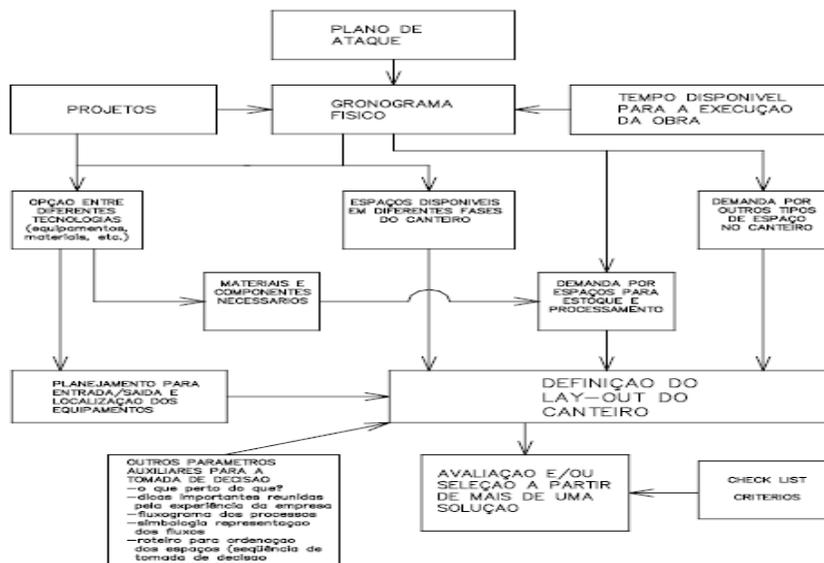


Figura 1 - Diagrama de layout produzido

Fonte: Dados levantados do canteiro de obras

A abordagem partiu de uma análise empírico-analítica no estudo de caso que se realizou a partir da técnica de coleta de dados, diretrizes de tratamento de dados e análise e interpretação dos mesmos, portanto, tratou-se de um estudo que teve como abrangência um tipo de pesquisa quantitativa sobre os aspectos referentes à observação das diretrizes de Segurança do Trabalho em instalações elétricas por trabalhadores de uma cooperativa de trabalho que presta serviços terceirizados para empresas de construção civil (ANDRADE, 2010).

Delimitou-se a observação e à estruturação do questionário apenas ao ambiente do canteiro de obras a partir das funções que tratam dos processos de instalações elétricas provisórias que abrange todas as instalações necessárias de maneira planejada e organizada para favorecer às rotinas de trabalho a energia para movimentar máquinas, manter o ambiente iluminado, etc.

As diretrizes foram realizadas de acordo com um projeto de execução de instalação elétrica provisória de acordo com a planta do canteiro de obras com o objetivo de evitar o deslocamento de instalações durante a execução da obra.

Partiu-se de um estudo de caso utilizando-se o raciocínio indutivo que teve como foco a análise de um fenômeno particular em uma só empresa, para compreender o fenômeno de forma geral. Segundo Andrade (2010, p. 43): “o raciocínio indutivo parte de fatos particulares para se chegar a conclusões gerais”.

No contexto do estudo, quanto aos procedimentos a investigação teve como

instrumentos de coleta: o questionário fechado com perguntas diretas. Os resultados se apresentam na forma de percentuais apresentados nos gráficos, como forma de demonstrar os resultados quantitativos.

Para aferir os resultados optou-se por levar em consideração os seguintes aspectos na coleta de dados:

- 1) Descrever a frequência de treinamentos na empresa terceirizada com as diretrizes da NR-10;
- 2) Apontar se há os procedimentos baseados nas diretrizes de segurança do NR-10;
- 3) Verificar a existência da elaboração de um projeto de instalações elétricas direcionada ao canteiro de obras;
- 4) Identificar diretrizes de antecipação de eventos possíveis de ocorrência de acidentes;
- 5) Buscar saber se a empresa utiliza um prontuário da instalação elétrica, como procedimentos de trabalho;
- 6) Avaliar o uso dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC's);
- 7) Apontar se a empresa terceirizada realiza treinamentos e planos de emergência.

O diagnóstico na empresa teve caráter observacional, onde foram descritos em um relatório os resultados detalhados da realidade empresarial delimitada aos problemas apresentados de 1 a 7, a fim de favorecer a interpretação dos dados levantados. A pesquisa pode ser classificada como um Estudo de Caso de cunho quantitativo, a demonstração estatística realizada a partir dos gráficos, demonstra a parte quantitativa (ANDRADE, 2010).

Os instrumentos de pesquisa tiveram como foco: o questionário e a observação direta. Quanto à natureza da pesquisa pode-se classificá-la como trabalho científico na área de Administração da Produção fundamentado em pesquisa empírica e trabalhos mais avançados, cuja finalidade é contribuir com novas análises sobre o tema, a partir de análise e interpretação dos fatos e ideias (ANDRADE, 2010).

O planejamento da pesquisa partiu do diagnóstico da empresa e a escolha dos perfis para responder ao questionário. A escolha partiu dos profissionais engajados na estrutura de organização da empresa terceirizada, no caso o supervisor (1) e os associados (11), perfazendo um total de 12 alvos de pesquisa. A realização da coleta de dados permitiu aos pesquisadores avançar para uma análise de resposta para os objetivos do trabalho, com base em instrumentos como o questionário estruturado que faz parte integrante do planejamento da pesquisa.

Segundo Andrade (2010, p. 148), “o questionário estruturado é um conjunto de perguntas que o informante responde, com perguntas claras e objetivas de acordo com os objetivos da pesquisa”. Escolheu-se neste caso um questionário fechado para uma

análise mais simplificada da apuração dos fatos. A realização desta pesquisa envolveu um estudo de um fenômeno que comumente envolve uma ampla gama de dados e uma amostragem com uma população de pesquisados ou do universo de 12 pessoas. Segundo Andrade (2010, p. 57), “a amostra é a menor representação de um todo maior denominado de universo”.

### 3 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme a análise de dados, demonstram-se os resultados por meio de gráficos, apresentando, os gráficos 1 e 2:

A Cooperativa realiza com frequência treinamentos de trabalhadores e ao uso das diretrizes da NR 10 nos procedimentos de instalações elétricas em Canteiros de Obras?

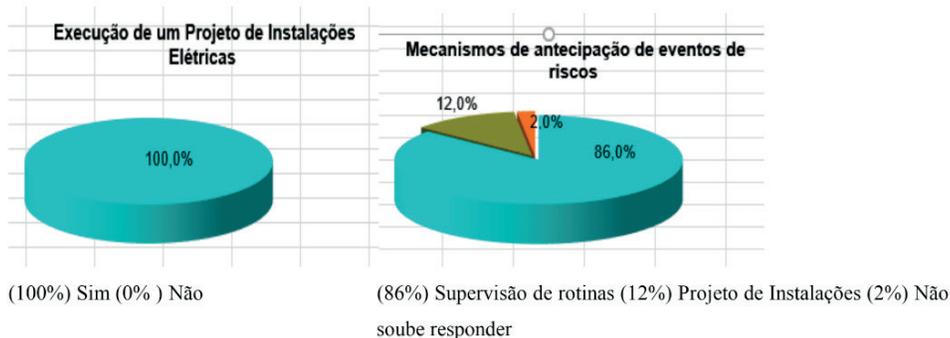


Gráficos 1 e 2 – Uso das diretrizes da NR 10 nos procedimentos de instalações elétricas em Canteiros de Obras?

Fonte: Pesquisa realizada (2020)

Como se evidencia no nos gráficos 1 e 2, buscou-se descrever a frequência de treinamentos na empresa terceirizada com as diretrizes da NR-10, sendo que 40% afirmaram que há uma frequência de treinamentos com a NR-10 e 60% afirmaram que não reconhecem essa frequência em termos de treinamento. O gráfico 2 demonstra que 10% dos associados avaliaram que não há os procedimentos baseados nas diretrizes de segurança do NR-10 e 90% consideraram que há o uso de orientações específicas da NR-10 na realização das atividades com energias elétrica.

A características mais predominante da NR-10 diz respeito à obrigatoriedade das empresas seguirem as normativas de segurança do trabalho, evitando-se falhas e desvios mais comuns com o objetivo de favorecer as condições de melhoria contínua dos processos de segurança do trabalho. De modo que manter a conformidade com normativa é um passo de grande importância para a redução de acidentes de trabalho nas atividades terceirizadas (FERRAZ, 2016).



Gráficos 3 e 4 – Execução de um projeto de instalações elétricas e mecanismos de antecipação de eventos de riscos

Fonte: Pesquisa de campo

Com base no gráfico 3 verificou-se a existência da elaboração de um projeto de Instalações elétricas direcionada ao canteiro de obras, constatando-se que 100% dos associados afirmaram que a empresa terceirizada executa sempre um projeto de instalações conforme o modelo do canteiro de obras.

A execução do projeto de instalações favorece as condições de aplicar diretrizes de segurança interna no canteiro de obras, o trabalhador poderá ficar vulnerável a descargas elétricas e ao arco elétrico perigoso ou mesmo em operações em instalações temporárias inadequadas. A realização das instalações elétricas faz parte efetiva das ações preventivas contra acidentes e fazem toda a diferença nos processos de produção na construção civil. É um mecanismo de controle sobre os procedimentos com a finalidade de determinar a melhoria dos processos (QUALHARINI, 2017).

Indagou-se no gráfico 4, a existência de diretrizes de antecipação de eventos possíveis de ocorrência de acidentes, 86% dos associados afirmaram ser a supervisão das tarefas, um mecanismo para evitar eventos de risco; 12% afirmaram que a realização do projeto de instalações e 2% não souberam responder.

Uma supervisão adequada que tem a probabilidade de evitar acidentes e danos à saúde do trabalhador, bem como um grande número de doenças ocupacionais dependendo da atividade desenvolvida e das condições de trabalho, bem como das medidas de prevenção, bem como os acidentes de trabalho, os danos à saúde as lesões causadas por traumas (quedas, choques, etc) poderão ser imediatas ou se desenvolver lentamente de acordo com o grau de exposição ao risco, gerando uma doença ocupacional,

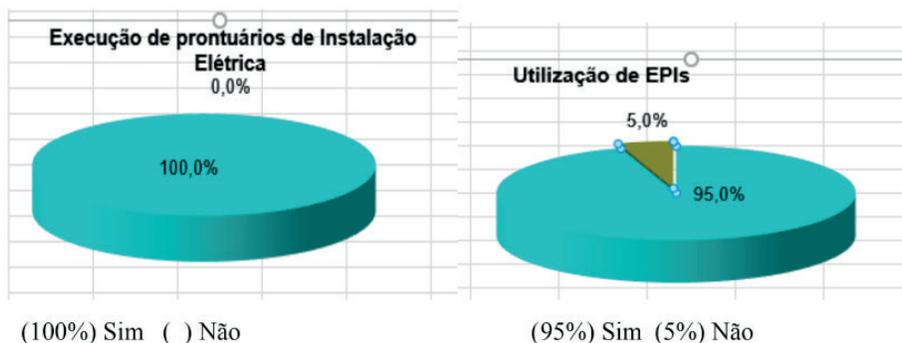


Gráfico 5 e 6 – Execução de prontuários de instalação elétrica e utilização de EPIs

Fonte: Pesquisa na empresa (2020)

De acordo com o gráfico 5, buscou-se saber se a empresa utiliza um prontuário da instalação elétrica, como procedimentos de trabalho, obtendo-se como resultado que 100% dos associados afirmaram que a empresa executa os prontuários de instalações elétricas de acordo com NR-10. Quanto ao uso dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC's), evidenciou-se que 95% dos associados utilizam integralmente os equipamentos de segurança e 5% avaliam que utilizam somente em algumas atividades e de forma incompleta.

Existe no trabalho com eletricidade um conjunto de situações de potencial risco, exigindo supervisão no início das atividades do trabalho, determinar os trabalhadores adaptados para realizar o trabalho e avaliação dos EPI's. Os acidentes de trabalho em altura têm um número elevado de casos de acidentes, exigindo das empresas, a responsabilidade de realizar treinamento dos trabalhadores.



Gráfico 7 – Execução de treinamento e planos de emergência

Fonte: Pesquisa na empresa (2020)

Buscou-se saber se a empresas terceirizada realiza treinamentos e planos de emergência. Evidenciou-se no gráfico 7 que 67% dos associados afirmaram que a cooperativa executa treinamentos e planos de emergência e 33% avaliou que o treinamento e o plano de emergência acontecem esporadicamente.

Conforme a NR-10, os empregadores deverão desenvolver programas de treinamento teórico e prático para auxiliar a defesa do trabalhador no trabalho em instalações elétricas, favorecendo as informações necessárias sobre análise de risco, regulamentações de segurança, procedimentos com equipamentos, condutas nos casos de ocorrência de imprevistos, incluindo procedimentos de resgate e aprendizagem de primeiros socorros (SALATIEL, 2015).

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo permitiu identificar as condições de segurança do trabalho em serviços terceirizados prestados por uma Cooperativa de Trabalho em instalações elétricas para empreiteiras na construção civil. O estudo delimitou à análise dos procedimentos de conformidade com NR-10 nas diretrizes de instalações elétricas provisórias no canteiro de obras em um estudo de caso na cidade de Videira em Santa Catarina.

Nos processos produtivos em construção civil, especialmente os que se direcionam ao espaço do canteiro de obras, são exigidos, o máximo possível de conformidade de modo que as construtoras preferem contratar empresas para terceirizar algumas atividades, como a instalação elétrica em canteiros de obras.

De modo que é muito importante a realização de estudo que tenham como meta contribuir com pesquisa empíricas sobre o tema, a fim de trazer discussões e análise trazendo uma luz as condições de proteção do trabalhador à fim de evitar alto índice de acidentes de trabalhos que decorrem das atividades realizadas pelas empresas terceirizadas no Brasil.

Considerou-se o estudo sucinto e resumido e, portanto, exigiria um número de cooperativas de trabalho mais abrangente com a finalidade de conhecer com mais exatidão a situação e trabalho dessas entidades. O que se evidenciou é que por conta do imperativo da competitividade a empresa pesquisa decidiu manter a conformidade com a NR-10.

A justificar para essa decisão é que a empresa tem contratos com empresas da construção civil e quando existem obras, a empresa já possui um tipo de confiabilidade entre os clientes.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Margarida de. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 2010.

FERNANDES DA SILVA, Paulo Renato. **Cooperativas de trabalho, terceirização de serviços e direito do trabalho**. 4. ed. São Paulo: LTr, 2017.

FERRAZ, Fernando Basto. **Terceirização e demais formas de flexibilização do trabalho**. 3. ed. São Paulo: LTr, 2016.

KRUEGER, Guilherme. **Cooperativas de Trabalho na terceirização**. 8. ed. São Paulo: Ed. Del Rey, 2014.

LOPES DA SILVA, Laércio. **A terceirização e a precarização nas relações de trabalho**. 1. ed. São Paulo: LTr, 2015.

MATTOS, Aldo Dórea. **Planejamento e controle de obras**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2010.

SALATIEL, Luís Henrique. **Gestão de serviços terceirizados: Construção e manutenção**. 6. São Paulo: Líder, 2015.

SIMÃO DE MELO, Raimundo. **Responsabilidade pelas normas de saúde e segurança do trabalho nas terceirizações**. 2018. Disponível em: <<https://www.conjur.com.br/2018-jan-12/reflexoes-trabalhistas-responsabilidade-pelas-normas-seguranca-terceirizacoes>>. Disponível em: 3 mar. 2020.

QUALHARINI, Eduardo. **Canteiro de obras**. 1. ed. São Paulo: Elsevier, 2017.

VELOSO NETO, Hernani. **Construção social do risco e da segurança do trabalho em contexto organizacional**. Rio de Janeiro: Civeri Publishing, 2013.

## REDUCTION OF THE ECOLOGICAL IMPACT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS WHEN USING SILICONE LIQUID IN THE PROVINCE OF ICA - 2013

*Data de aceite: 01/07/2021*

*Data de submissão: 11/06/2021*

### **Primitivo Bacilio Hernández Hernández**

Universidad Nacional San Luis Gonzaga  
<https://orcid.org/0000-0003-3028-6671>  
Ciudad de Ica

### **Omar Michael Hernández García**

Universidad Nacional San Luis Gonzaga  
<https://orcid.org/0000-0002-0131-8788>  
Ciudad de Ica

### **Aníbal Bacilio Hernández García**

Universidad Nacional San Luis Gonzaga  
<https://orcid.org/0000-0002-1472-3205>  
Ciudad de Ica

### **Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez**

Universidad Nacional San Luis Gonzaga  
<https://orcid.org/0000-0001-8721-7939>  
Ciudad de Ica

### **Walter Merma Cruz**

Universidad Nacional de Moquegua- Perú  
Escuela Profesional de Ingeniería Pesquera  
<https://orcid.org/0000-0003-3742-6235>

### **Edward Paul Sueros Ticona**

Universidad Nacional de Moquegua- Perú  
Escuela Profesional de Ingeniería Pesquera  
<https://orcid.org/0000-0003-4609-2185>  
Ciudad de Tacna

que se tendría en la provincia de Ica al reemplazar el fluido de silicona líquida a los transformadores instalados en subestaciones aéreas monoposte, subestaciones aéreas biposte, subestaciones en caseta y subestaciones en bóveda; la reducción del impacto está relacionado al número de transformadores que se aplicaría en la provincia de Ica, por lo cual se trata de un tipo de investigación aplicada o tecnológica con aplicación inmediata a un problema determinado. La metodología aplicada fue Identificar la cantidad de las subestaciones monoposte, biposte, determinar la ubicación de cada subestación, medir y determinar las características de cada subestación, medición de parámetros eléctricos: voltaje, corriente, factor de potencia, frecuencia, luego representar en un cuadro indicando potencia de cada transformador de distribución. Se ha determinado que en la provincia de Ica cuenta con 1,500 transformadores de distribución instalados de la siguiente manera, 132 subestaciones, en caseta 419 subestaciones monoposte y 949 subestaciones aéreas biposte. concluyendose que al efectuar el cambio de uno de los transformadores de 250 Kva., con fluido de silicona líquida la vida útil del transformador será de sesenta años, con una evaluación permanente en donde no requiere mantenimiento y se reducirá el impacto ecológico, el fluido de silicona no contamina el suelo, el aire y el tiempo de vida útil es el doble.

**PALABRAS CLAVE** transformador, fluido dieléctricos, sistema de gestión ambiental.

**RESUMEN:** El objetivo del trabajo de investigación fue evaluar el beneficio ambiental

# REDUCCIÓN DEL IMPACTO ECOLÓGICO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN AL UTILIZAR LIQUIDO DE SILICONA EN LA PROVINCIA DE ICA

## - 2013

**ABSTRACT:** The objective of the research work was to evaluate the environmental benefit that would be had in the province of Ica by replacing liquid silicone fluid in the transformers installed in single-pole overhead substations, two-post overhead substations, house substations and vault substations; the reduction of the impact is related to the number of transformers that would be applied in the province of Ica, which is why it is a type of applied or technological research with immediate application to a specific problem. The applied methodology was Identify the quantity of single-pole and two-pole substations, determine the location of each substation, measure and determine the characteristics of each substation, measurement of electrical parameters: voltage, current, power factor, frequency, then represent in a table indicating the power of each distribution transformer It has been determined that in the province of Ica it has 1,500 distribution transformers installed as follows, 132 substations, 419 single-pole substations and 949 two-pole overhead substations, concluding that when changing one of the 250 Kva transformers, of liquid silicone fluid, the useful life of the transformer will be sixty years, with a permanent evaluation, it does not require maintenance and the ecological impact will be reduced, the silicone fluid does not pollute the soil, air, lifespan is double.

**KEYWORDS:** transformer, dielectric fluid, environmental management system.

## 1 | INTRODUCCIÓN

En 1831 inicia los estudios de Inducción electromagnética en el que se basa el funcionamiento del transformador, en la región de Ica, se inicia el transporte de energía en enero del año 1912, ampliando permanentemente las fronteras eléctricas; por lo tanto, se están instalando transformadores de distribución en la provincia de Ica, en las subestaciones aéreas monopostes, biposte y en caseta refrigeradas con aceite mineral dieléctrico.

En la actualidad los transformadores de distribución y de potencia utilizan aceite mineral dieléctrico cumpliendo doble función, la de refrigerante y aislante, éste aceite utilizado es altamente contaminante, perjudicando el subsuelo y el aire; por lo que realiza esta labor de investigación con el propósito de corregir esta falencia, que permite identificar las deficiencias y mejoras, por cuanto se efectuó estudios en el empleo de “fluido de silicona líquida” el mismo que no tiene efectos contaminantes, reduciéndose el impacto al medio ambiente, al tener un punto de inflamación y combustión más alto.

Asimismo, el fluido de silicona líquida posee mayor resistencia a la oxidación que los aceites minerales dieléctricos lo que facilita alcanzar temperaturas superiores a la de los aceites minerales.

Actualmente la humanidad enfrenta problemas de contaminación ambiental, de la cual nuestro país no es ajeno a este problema y muy especialmente nuestra región. Actualmente existe en el mundo, sobre todo en los países en desarrollo, la industria que contamina el medio ambiente, siendo este trabajo de investigación una forma de promover

la disminución de la contaminación existente.

La investigación de esta problemática nos ha permitido definir el objetivo de este trabajo que es: proponer un producto alternativo llamado reducción del impacto ecológico de los transformadores de distribución, y cómo utilizarlo de forma sencilla; describir las ventajas y desventajas.

El propósito fundamental es preservar nuestro medio ambiente, reemplazando el uso del aceite mineral dieléctrico por los daños que viene ocasionando al hombre y a la naturaleza, haciendo uso del avance científico y tecnológico es necesario el cambio por fluido de silicona líquida el mismo que ha desarrollado mejores performances de rendimiento y alargando la vida útil del transformador, el mismo que se realizó en la Provincia de Ica.

Cuando se produce un cortocircuito los transformadores producen humo que contaminan el aire, lo que no ocurre con los transformadores de distribución cuando utilizan fluido de silicona líquida.

### **Objetivo general**

- Evaluar la reducción del impacto ecológico de los transformadores de distribución al utilizar líquido de silicona en la provincia de Ica

### **Objetivos específicos**

- Diagnóstico del número de transformadores de distribución en la provincia de Ica.
- Cambio del aceite mineral dieléctrico a los transformadores instalados en subestaciones aéreas monoposte, subestaciones aéreas biposte, subestaciones en caseta y subestaciones en bóveda en un módulo demostrativo.
- Determinación del impacto ambiental que origina el uso de fluido de silicona líquida como refrigerante en los transformadores de distribución y su comparación con el aceite mineral dieléctrico en un módulo demostrativo.

## **2 | BASE TEORICA**

López, M. (1994), describe que las propiedades del líquido de silicona permiten comparar sus características respecto a las de otros líquidos aislantes como el aceite mineral y el askarel. Pueden distinguirse tres clases de propiedades en cuanto a los materiales aislantes se refiere: Propiedades físicas, químicas, y propiedades eléctricas. El líquido de silicona logra puntos intermedios en algunas propiedades, y en otras supera al aceite mineral y al askarel. Con el fin de permitir una mayor claridad se hará una breve descripción de las propiedades para el líquido de silicona, y en general como se entienden para cualquier líquido aislante haciendo principal énfasis en las propiedades dieléctricas.

Los transformadores de distribución comprenden esencialmente un circuito

magnético sobre lo que están dos o, más arrollamientos de cobre, generalmente separados entre sí que ejercen inducción mutua debido a la corriente alterna.

El transformador monofásico es un equipo que consta de 2 bobinas que permiten por medio de la inducción electromagnética, convierten energía en un sistema monofásico de un nivel de tensión de 10000/220 v y 22,900/220v, la provincia de Ica tiene instalados sus transformadores van en subestaciones aéreas monoposte de las siguientes potencias 5 KVA, 6KVA, 7.5KVA, 10 KVA, 12 KVA, 15 KVA, 17,5 KVA.

El transformador trifásico son máquinas estáticas que están conformadas, por tres bobinas que permiten por inducción electromagnética convertir la energía trifásica de niveles de media tensión de 10,000v y 22,900v como es el caso de la provincia de Ica a niveles de baja tensión como. 220v, 380, 440v. de las siguientes potencias desde 25 KVA, 28 KVA, 30KVA, 32KVA, 37.5KVA, 38KVA, 40KVA, 50KVA, 52,5KVA, 64KVA, 65KVA, 73KVA, 75KVA, 80KVA, 100KVA, 112KVA, 120KVA, 125KVA, 160KVA, 170KVA, 200KVA, 220KVA, 250KVA, 260KVA, 315KVA, 320KVA, 400KVA, 460KVA, 500KVA, 630KVA, 800KVA, 1000KVA, 1250KVA, 1600KVA, 2000KVA, Ubicados en casetas y subestaciones aéreas monoposte y biposte.

Uno de los fluidos ecológicos es el fluido de silicona, siendo un Polidimetilsiloxano (PDMS) puro que no contiene aditivos, la cual posee excelentes propiedades dieléctricas y alta conductividad térmica.

La silicona proporciona las siguientes ventajas:

- Es un material degradable, reciclable y de fácil eliminación.
- Insoluble en el agua
- Alto punto de inflamación 370° C.
- Alta clase térmica 220° C.
- Buen medio de transferencia de calor.
- No es volátil, es térmicamente estable y químicamente inerte.
- Presenta un peligro de incendio mucho menor que los otros líquidos aislantes.
- Es compatible con los materiales utilizados en la construcción de los Transformadores. La silicona proporcionada es totalmente compatible con otras similares, pudiendo por lo tanto mezclarse con cualquier otro fluido de silicona aislante de marca.
- La estabilidad térmica y la ausencia de polaridad de los fluidos de silicona hacen que se reduzca drásticamente la necesidad de mantención. El fluido de silicona no se deteriora durante su operatividad, es decir, en el tiempo de vida útil del Transformador

## Los transformadores de distribución en la provincia de Ica.

Se encuentran operando con un trabajo permanente durante las 24 horas durante los doce meses al año.

El crecimiento del radio urbano que está uniéndose el Cercado de Ica con los distritos, el crecimiento de los Centros Poblados están constantemente instalaciones de medidores monofásicos y trifásicos; estos nuevos usuarios están incrementando la carga a los transformadores los cuáles deben evaluarse los parámetros principales como tensiones y corrientes.

Cálculo de los costos comparativos de aceite mineral versus fluido de silicona líquida con miras a determinar una relación beneficio-costo de la sustitución.

### 3 | MATERIAL Y MÉTODOS

#### Tipo de investigación

El trabajo de investigación reducción del impacto ecológico de los transformadores de distribución al utilizar líquido de silicona en la provincia de Ica.

En lo que se refiere a la investigación básica, esta es del tipo no experimental (ex post facto), de carácter transeccional porque se recolectan los datos en un solo momento y en un tiempo único. En lo referente a la propuesta, se plantean alternativas para dar solución al problema planteado.

#### Metodología de la Investigación

En el desarrollo del presente trabajo, el método de investigación descriptiva con la finalidad de ver los efectos de ambos refrigerantes a fin de mejorar y establecer el uso de la nueva tecnología como es el fluido de silicona líquida.

#### Diseño de la Investigación

Se explica el impacto ecológico producido por los transformadores utilizando aceite mineral, e incorporando el fluido de silicona líquida, disminuyendo la contaminación. Por lo cual se definen los principios sobre los cuales se sustenta la política ambiental de las entidades poseedoras de aplicaciones con PCBs (Los Bifenilos Policlorados, figuran entre las Sustancias Químicas más Peligrosas), los que se relacionan a continuación:

- Revisión ambiental inicial basada en la identificación de aplicaciones con PCBs y evaluación del nivel de gestión ambiental. Propuesta de condiciones seguras de manipulación.
- Logro de condiciones de instalación seguras para equipos que aún se encuentran en servicio.
- Logro de condiciones seguras de almacenamiento para equipos en uso y en desuso.

- Adecuada capacitación del personal involucrado.

En la evaluación del nivel de gestión se deben tener en cuenta dos aspectos fundamentales: primero, el inventario de los residuos que generan e implica verificar la confiabilidad de los resultados que han sido obtenidos y segundo, la forma en que manejan y gestionan estos residuos.

## **Identificación de variables**

Las variables en el presente trabajo de investigación son:

### **Variable independiente:**

Cantidad de silicona líquida.

### **Variable dependiente:**

Impacto ecológico de los transformadores

## **Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.**

En el proceso de desarrollo del trabajo de investigación fue utilizar técnicas, que constituyen el conjunto de que se han utilizado para la obtención de los datos necesarios de los transformadores de distribución, cuyo proceso fue el siguiente:

Identificación de la cantidad de las subestaciones monoposte, biposte. En caseta en la provincia de Ica, donde están instalados los transformadores de distribución.

Determinar la ubicación de cada subestación.

Medir y determinar las características de cada subestación.

Medición de parámetros eléctricos: Voltaje, corriente, factor de potencia, frecuencia.

Elaboración de cuadros respectivos, indicando potencia de cada transformador de distribución.

## **Población-Muestra**

La población está representada por todos los transformadores que existen en la provincia de Ica.

## **Modelo de Muestra**

Se ha tomado como inicio de aplicación del desarrollo de la presente trabajo, la subestación en caseta ubicada en la ciudad Universitaria de la universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, siendo esta un Transformador de Distribución de 250 Kva, 10000/230 V, para cambiar el aceite mineral dieléctrico por el fluido de silicona líquida. Transformador: 250 Kva

## **Instrumentos**

- Termómetros: indicador de temperatura del vanado, puede ser:
- Termómetro con sensor bimetálico
- Termómetro de montaje remoto

- Reveladores Mecánicos
- Indicadores de Presión / vacío, vacuometro
- Espinterómetros, para pruebas de rigidez dieléctrica del aceite mineral
- Medición de la Resistencia de los vanados, comprobación de conexiones
- Pruebas de aislamiento
- Medición de la Relación de Transformación, verificación de la polaridad y relación de fase
- Medición de las tensiones de corto circuito.
- Medición de las pérdidas con carga.
- Medición de las corrientes y pérdidas sin carga (vacío).
- Ensayos de tensión aplicada.
- Ensayo de sobre tensión inducida.
- Banco de Pruebas para los transformadores.

## 4 | RESULTADOS

### Presentación y descripción de transformadores en Ica

Desarrollando el levantamiento de información se puede indicar que como resultado se tiene un cuadro detallado de transformadores, donde se describe su potencia nominal, relación de transformación, ubicación, tipo del local, la que se puede observar en el cuadro siguiente:

<b>N°</b>	<b>Potencia Nominal (kVA)</b>	<b>Relacion de Transf.</b>	<b>Ubicacion</b>	<b>Local</b>	<b>TIPO S.E.</b>
1	160	10/.23	CALLE LAMBAYEQUE, 2ª CUADRA	Cercado	CASETA
2	320	10/.23	CALLE LIMA, 3ª CUADRA	Cercado	CASETA
3	250	10/.23	PASAJE MOQUEGUA - PUNO (MONJAS)	Cercado	CASETA
6	200	10/.23	AV. GRAU N°105	Cercado	CASETA
7	100	10/.23	AV GRAU N°105	Cercado	CASETA
19	25	10/.23	CALLE FERMIN TANGUIS 2º CUADRA URB. SAN MIGUEL	Cercado	CASETA
20	160	10/ .38-.23	CALLE BENEDICTA LUCES 1ºCUADRA URB. SAN MIGUEL	Cercado	CASETA

23	125	10/23	BELLSOUTH	Cercado	CASETA
6	160	10/23	AV. GRAU N° 105	Cercado	CASETA
7	100	10/22	AV. MUNICIPALIDAD N° 220-228	Cercado	CASETA
7	500	10/23	CALLE TACNA, 1ª CUADRA	Cercado	CASETA
7	160	10/22	AV. MUNICIPALIDAD N° 216	Cercado	CASETA
9	320	10/23	CALLE LIBERTAD, 3ª CUADRA - URB. SAN FRANCISCO	Cercado	CASETA
10	100	10/22	HUANUCO 242	Cercado	CASETA
11	500	10/38-.22	AV SAN MARTIN 315	Cercado	CASETA
12	100	10/23	CALLE PUNO, 2ª CUADRA (MERCADO MODELO)	Cercado	CASETA
13	160	10/23	CALLE URUBAMBA, 3ª CUADRA	Cercado	CASETA
14	250	10/23	CALLE PISCO, 4ª CUADRA	Cercado	CASETA
15	250	10/23	CALLE PALPA, 1ª CUADRA	Cercado	CASETA
16	160	10/23	CALLE BOLIVAR, 9ª CUADRA	Cercado	CASETA
1092	25	22.9/23	OCUCAJE	OCUCAJE	SAM
18	320	10/38-.23	AV. F. LEON DE ARECHUA, 1ª CUADRA - URB. SAN MIGUEL - C.E. "NUESTRA SRA. DE LAS MERCEDES"	Cercado	CASETA
19	200	10/38-.23	CALLE FERMIN TANGUIS, 2ª CUADRA - URB. SAN MIGUEL	Cercado	CASETA
19	25	10/22	CALLE FERMIN TANGUIS, 2ª CUADRA - URB. SAN MIGUEL	Cercado	CASETA
20	160	10/38-.23	CALLE BENEDICTA LUCES, 1ª CUADRA - URB. SAN MIGUEL - ESTADIO PICCASO PERATA	Cercado	CASETA
22	160	10/23	CALLE J.J. ELIAS, 2ª CUADRA - COLEGIO SAN LUIS GONZAGA	Cercado	CASETA
23	160	10/38-.23	AGRUPAMIENTO SAN MARTIN	Cercado	CASETA
23	125	10/23	BELLSOUTH	Cercado	CASETA
24	100	10/23	URB. SANTA ANITA MZ. "J" - AV. - CUTERVO	Cercado	CASETA
25	2000	10/22	BOLIVAR S/N	Cercado	CASETA
26	250	10/22	PARQUE INDUSTRIAL MZ. B - LT. 6-11	Cercado	CASETA
28	160	10/22	AV. LOS MAESTROS - OVALO SAN JOSE	Cercado	CASETA

29	50	10/22	HACIENDA SAN JOSE	Cercado	CASETA
30	160	10/22	INTERIOR HOSPITAL REGIONAL - COMATRANA S/N	Cercado	CASETA
31	160 y 25	10/38-.23	CAMINO A HUACACHINA - HOSPITAL REGIONAL - FRENTE A P.J. LOS FICUS Y LOS PACHECOS	Cercado	CASETA
32	160	10/23	AV. NICOLAS DE RIVERA EL VIEJO, 2ª CUADRA - URB. LUREN	Cercado	CASETA
32	100	10/22	AV. NICOLAS DE RIVERA EL VIEJO 227 - URB. LUREN	Cercado	CASETA
33	250	10/22	AV. MANUEL SANTANA CHIRI 903 - URB. LUREN	Cercado	CASETA
35	200	10/22	AV. GRAU 198	Cercado	CASETA
35	250	10/23	AV. GRAU 199	Cercado	CASETA
36	160	10/22	URB. SAN ISIDRO S/N	Cercado	CASETA
36	160	10/23	CALLE LAS MARGARITAS - PARQUE - URB. SAN ISIDRO	Cercado	CASETA
1040	37.5	10/23	FUNDO LA GUERRERO.	LOS AQUIJES	SAM
38	250	10/38-.23	CALLE LAS AMAPOLAS - PARQUE - URB. SAN ISIDRO	Cercado	CASETA
39	250	10/38-.23	URB. SANTO DOMINGO DE MARCONA MZ. "F"	Cercado	CASETA
40	250	10/23	UNIDAD VECINAL	Cercado	CASETA
41	160	10/38-.23	URB. STA. MARIA MZ. "A"	Cercado	CASETA
42	250	10/38-.23	URB. STA. MARIA MZ. "K"	Cercado	CASETA
43	200	10/22	URB. SAN JOAQUIN F-500	Cercado	CASETA
1086	80	10/398-230	PONGO CHICO	PUEBLO NUEVO	SAM
44	250	10/38-.23	URB. LAS DUNAS MZ. "K" - SAN JOAQUIN	Cercado	CASETA
45	250	10/38-.23	URB. S. JOAQUIN II ETAPA MZ "X"	Cercado	CASETA
46	250	10/38-.23	URB. S. JOAQUIN II ETAPA MZ "T"	Cercado	CASETA
47	100	10/38-.23	AV. ARENALES, ALTURA DE LA DIROVE - URB. SAN JOAQUIN	Cercado	CASETA
49	200	10/22	HDA. VISTA ALEGRE - HORNO VIEJO	Parcona	CASETA
50	160	10/22	HACIENDA LOS POBRES - VITIVINICOLA POZO (Pb-59)	Salas Guadalupe	CASETA
51	160	10/38-.23	CALLE EL PARQUE - URB. LA ANGOSTURA	Cercado	CASETA

52	250	10/.38-.23	EXT. HOTEL AUSTRIA - URB. LA ANGOSTURA	Cercado	CASETA
53	250	10/.38-.23	LOS EUCALIPTOS MZ. "Q" - URB. LA ANGOSTURA-	Cercado	CASETA
54	250	10/.38-.23	LAS FONCIANAS MZ. "R" - URB. LA ANGOSTURA	Cercado	CASETA
1042	60	10.38-/.23	C.P.VIRGEN DE FATIMA	SAN JUAN BAUTISTA	SAM
1087	100	10/.38-.23	AGRICOLA DON LUIS S.A.	SAN JUAN BAUTISTA	SAB
140	100	10/.38-.23	CALLE 18 FEBRERO, 8ª CUADRA	Parcona	SAB
141	50	10/.38-.23	INTERSECCIÓN AV. ARMANDO REVOREDO Y 3 DE OCTUBRE	Tinguiña	SAM
142	100	10/.38-.23	INTERSECCIÓN AV. PACHACUTEC - CESAR VALLEJO - PARCONA	Parcona	SAB

### Contaminación e impacto ecológico producido en la ciudad de Ica.



Foto 1: Se aprecia la contaminación del aceite mineral en el transformador

En la subestación en caseta No. 04 ubicada en la ciudad universitaria de la Universidad San Luis Gonzaga de Ica, están instalados dos transformadores de distribución de 250 Kva., de 10 000 / 230 voltios refrigerados con aceite mineral los cuales al ser evaluados, se encuentran trabajando a un 70% de su capacidad instalada.

También se tiene como resultado que la subestación en caseta con los dos transformadores de distribución atiende a las Facultades de Enfermería, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Laboratorio de Ingeniería Electrónica, la Facultad de Farmacia y Bioquímica y otros edificios que se encuentran en el radio de distribución de las indicadas subestaciones. Los cuales deben ser evaluados en forma permanente un mantenimiento oportuno los que tendrían una vida útil de 30 años.

## Cambio de fluido de silicona líquida a los transformadores instalados en subestaciones aéreas



Foto 2: Se aprecia cambio de silicona líquida a los transformadores



Foto 3: Pruebas con pinza amperimétrica

### Interpretación de resultados.

Al efectuar el cambio de uno de los transformadores de 250 Kva., el de fluido de silicona líquida la vida útil del transformador será de sesenta años, con una evaluación permanente no requiere mantenimiento y se reducirá el impacto ecológico el fluido de silicona no contamina el suelo, el aire, el tiempo de vida útil es el doble.

### Pruebas a los transformadores con líquido de silicona

Se tiene como resultado que disminuyó la contaminación ambiental, por lo cual actualmente se viene utilizando con éxito los aisladores de silicona en redes eléctricas los cuales no requieren mantenimiento, la misma que tiene un uso en estos momentos a nivel mundial

## 5 | CONCLUSIONES

- El total de transformadores ubicados en la ciudad de Ica. Las subestaciones con que cuenta la provincia de Ica son 1,500 transformadores de distribución instalados de la siguiente manera: 132 subestaciones en caseta, 419 subestaciones monoposte y 949 subestaciones aéreas biposte.
- El cambio por fluido de silicona líquida a los transformadores instalados en subestaciones aéreas monoposte, subestaciones aéreas biposte, subestaciones en caseta y subestaciones en bóveda en un módulo demostrativo, resulto positiva su remplazo.
- El impacto ambiental que origina el uso de fluido de silicona líquida como refrigerante en los transformadores de distribución y su comparación con el aceite mineral dieléctrico en un módulo demostrativo, ambientalmente tiene un impacto bastante positivo.

## REFERENCIAS

Alarcón, P. Pruebas Eléctricas de Rutina a Transformadores

Avelino, P. Transformadores de Distribución. Teoría y Cálculo

Corrales, J. Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores. 5ta. Edición. Editorial Labor.

Dobson, S.; van Esch, G.J. (1993) Environmental Health Criteria 140: Polychlorinated Biphenyls and Terphenyls. Segunda Edición; Organización Mundial de la Salud, Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas (IPCS): Ginebra, Suiza.

López M. (1994), "El líquido de silicona en transformadores eléctricos: Características, uso y mantenimiento.

Hernandez R, et. al. (2006) "Metodología de la Investigación, 4ta edición Editorial MC-Graw – Hill"

Sierra R. (2002) Tesis Doctorales y Trabajos de INVESTIGACIÓN. Quinta Edición. Editorial Thomson.

## **SOBRE A ORGANIZADORA**

**LILIAN COELHO DE FREITAS** - Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Possui graduação em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Pará (2007) e mestrado em Computação Aplicada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFPA, obtido em 2009. Em 2008, realizou estágio de mestrado no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC/Porto - Portugal). Atuou como pesquisadora membro do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA/UFPA) de 2004 a 2014 e do Laboratório de Sensores e Sistemas Embarcados (LASSE/UFPA) de 2008 a 2012. Atuou como Pesquisadora Visitante no Georgia Institute of Technology (Atlanta, Georgia, Estados Unidos), no período de Março/2012 a Fev/2013. Tem mais de 50 trabalhos publicados, envolvendo publicações em livros, revistas e eventos científicos. Seus interesses de pesquisa são: telecomunicações (comunicações sem fio, rádio cognitivo) e machine learning.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Agronegócio 11, 45, 86, 87, 112

AMPL 10, 47, 48, 49, 52, 53, 55, 58, 59, 61

Arduino Uno 116, 117, 118

### B

Biocombustíveis Sólidos 62

Biomassa 24, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 88, 89, 90, 91, 95, 100, 101, 103, 107, 108, 113, 135, 136, 137, 141, 142

### C

Canteiro de Obras 143, 144, 145, 150, 151, 152, 154, 156

Carbonização 62, 64, 68, 69, 71

Construção Civil 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 156

Consumo 11, 24, 63, 78, 83, 96, 98, 100, 101, 103, 108, 109, 112, 116, 117, 118

Controladores Fuzzy 10, 39, 44, 45

Cooperativa 143, 145, 148, 149, 151, 153, 156

Coproduto 135, 141

Corrente 1, 5, 12, 75, 80, 91, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 116, 117, 146

### D

*Dielectric Fluid* 159

### E

Energia 9, 11, 2, 5, 8, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 48, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 122, 123, 135, 136, 138, 141, 142, 150, 151

Energia Elétrica 11, 2, 24, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 61, 73, 74, 76, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 98, 100, 102, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 141, 150

*Environmental Management System* 159

Excentricidade 120, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132

### F

Filtros Planares 120, 122, 124

Fluxo de Carga 9, 10, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 61

Fontes Renováveis 24, 63, 87, 89, 114

Fuzzy 10, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46

## **G**

Geometria Elíptica 120, 124, 125, 131

## **I**

Identificação de falhas em rolamentos 1

Inteligência Artificial 10, 1, 3, 12, 13, 15, 16

## **L**

Lógica Fuzzy 10, 15, 16, 17, 20, 23, 36, 37, 39, 40, 44, 45

## **M**

Mamdani 18, 19, 20, 39, 40, 44

Medidor 11, 116, 117, 118, 119

Motor de indução trifásico 1

## **O**

Otimização Matemática 47, 48, 49, 53, 61

## **P**

Pirólise 10, 62, 68, 135, 136

## **R**

Reconfiguração Automática 87, 89, 94, 114

Redes Inteligentes 86, 87, 88, 91

Resíduos Agroindustriais 62, 63

## **S**

SIF 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 35

Sistemas Elétricos de Potência 9, 10, 47

Sistemas Fotovoltaicos 9, 23, 73, 77

*Solver Knitro* 47

Sombreamento 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 84, 85

Sustentabilidade 27, 63, 73, 84, 86

## **T**

Tensão 51, 74, 87, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 113, 116, 117, 150

Terceirizados 143, 144, 145, 146, 151, 156, 157

Torrefação 62, 64, 68, 69, 70, 71, 135, 136, 137, 138, 141

Transformadas no domínio tempo-frequência 1

*Transformer* 159

## **V**

Viabilidade 66, 73, 74, 77, 82, 84, 85, 86, 88, 93, 108, 110, 114

COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA ELÉTRICA**



[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)



[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

**Atena**  
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA



[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)



[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

 **Atena**  
Editora

Ano 2021