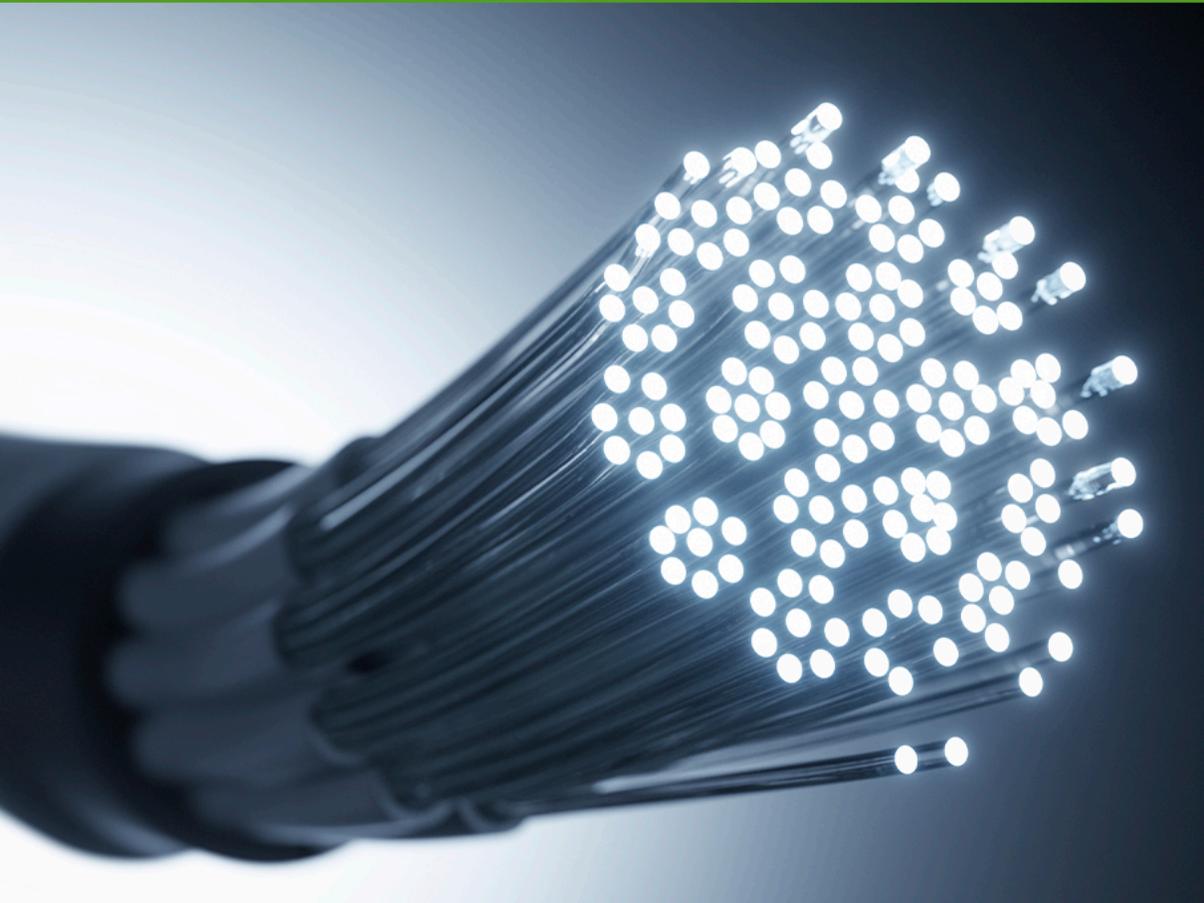


COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA

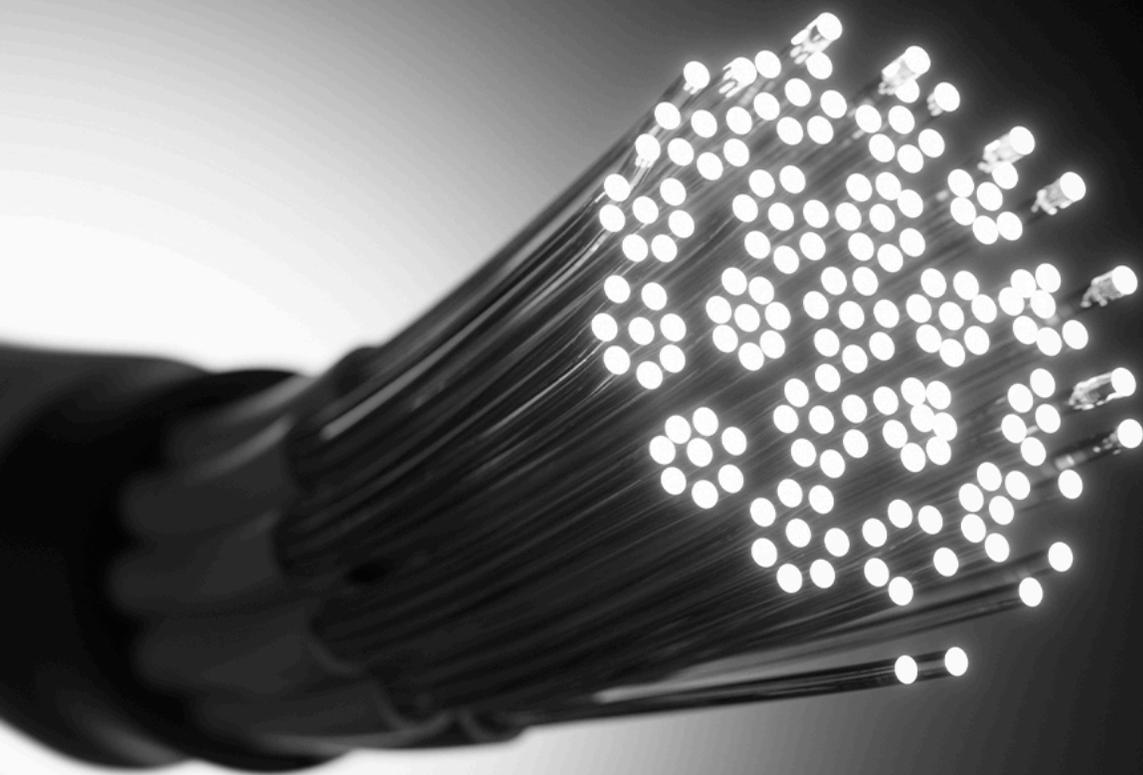


LILIAN COELHO DE FREITAS  
(ORGANIZADORA)

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 Cremona

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 Tárzia 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**

## 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.

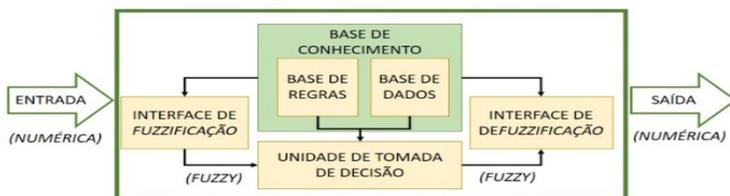


Fig. 1. Etapas de um Sistema de Inferência Fuzzy.

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.

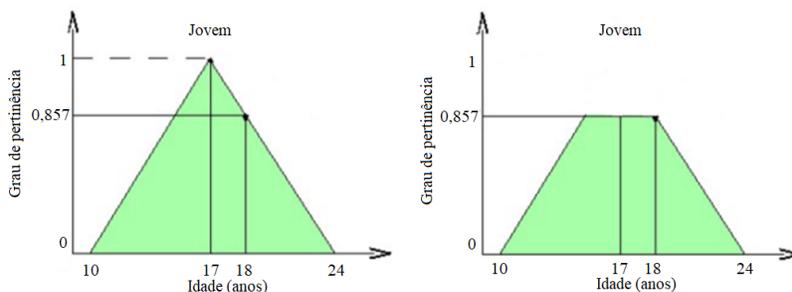


Fig. 2. Exemplo do processo de fuzzificação.

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.

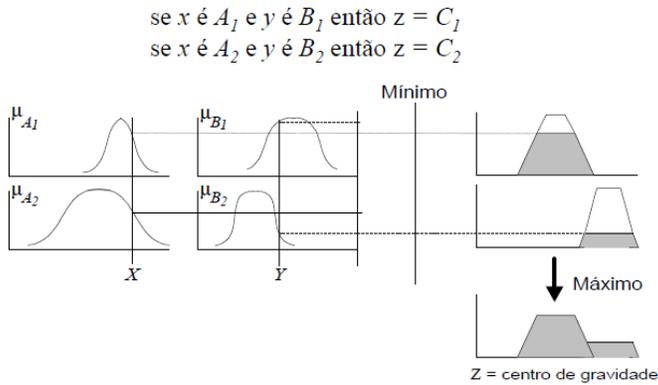


Fig. 3. Exemplo de SIF com controlador Mamdani [11].

#### 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  $z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

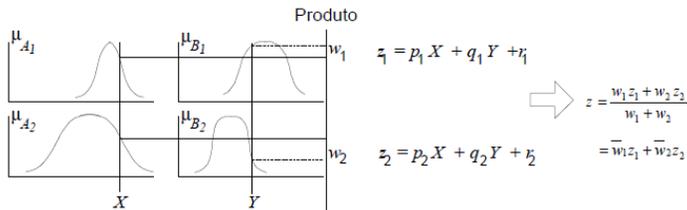


Fig. 4. Exemplo de SIF com controlador Sugeno [11].

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.

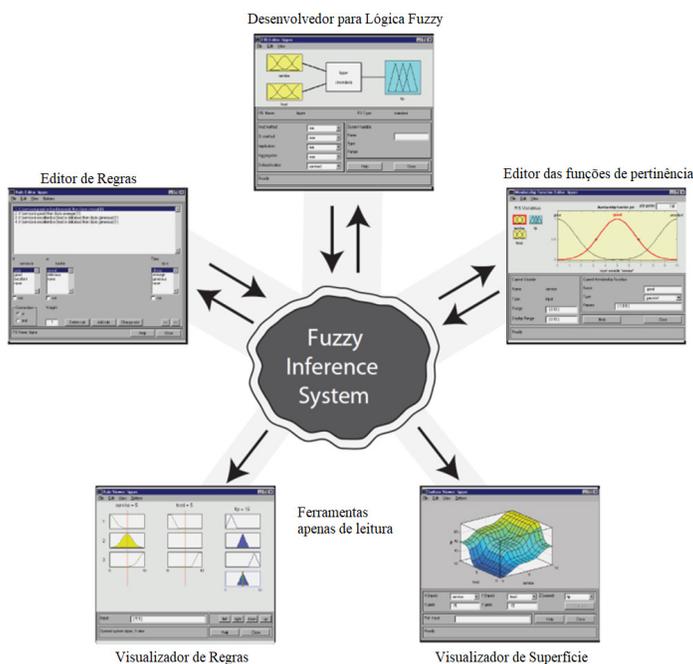


Fig. 5. Visão geral da caixa de ferramentas para os SIFs e seus recursos no Matlab [6].

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.

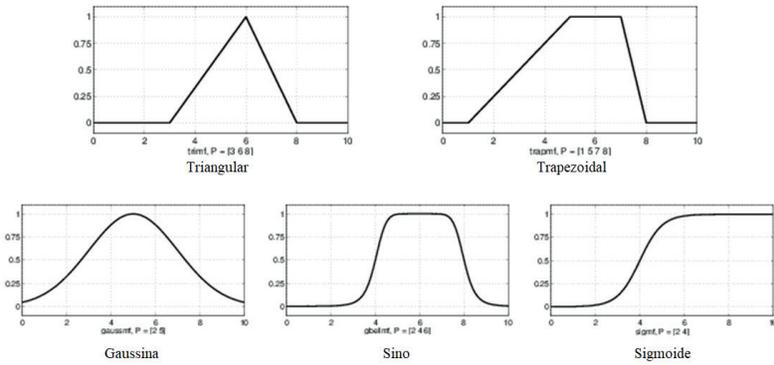


Fig. 6. Formato genérico de algumas funções de pertinência, presentes no Matlab [6].

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.

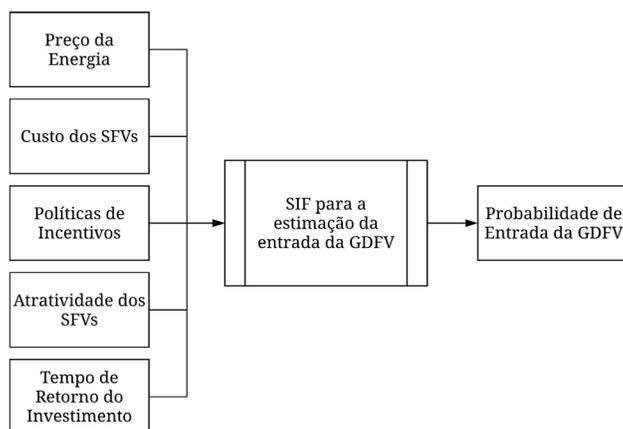


Fig. 7. SIF para determinar o percentual de entrada da GDFV.

#### 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*.

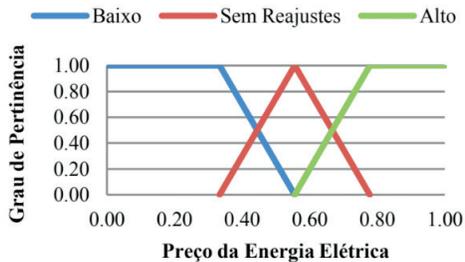


Fig. 8. Subconjuntos da variável de entrada Preço da Energia Elétrica.

## 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.

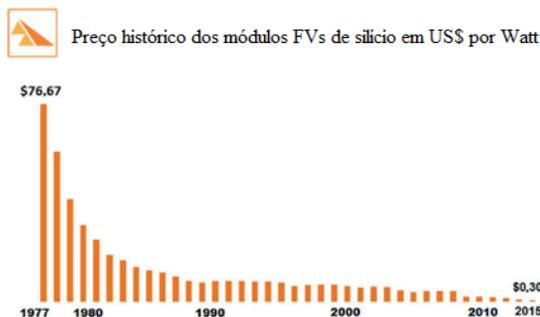


Fig. 9. Preço histórico dos módulos fotovoltaicos do ano 1977 a 2015 em US\$/W.

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*.

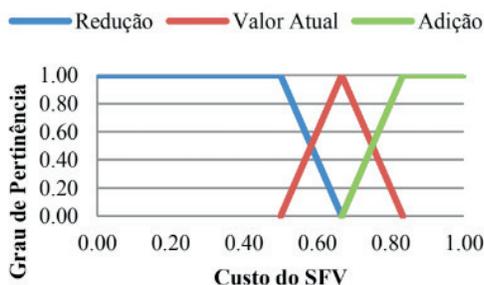


Fig. 10. Subconjuntos da variável de entrada Custo dos SFV.

## 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*.

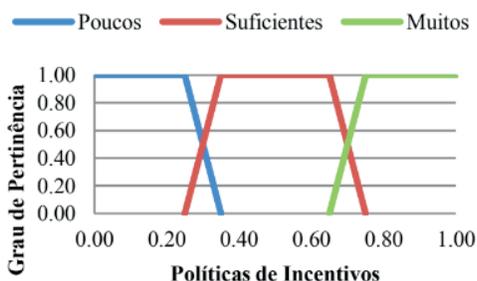


Fig. 11. Subconjuntos da variável de entrada Políticas de Incentivo.

## 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*.

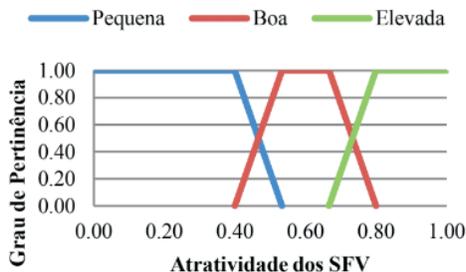


Fig. 12. Subconjuntos da variável de entrada *Atratividade dos SFV*.

## 8 | 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
Curto	Trapezoidal	0,00	0,00	0,20	0,40
Aceitável	Trapezoidal	0,20	0,40	0,60	0,80
Longo	Trapezoidal	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*.

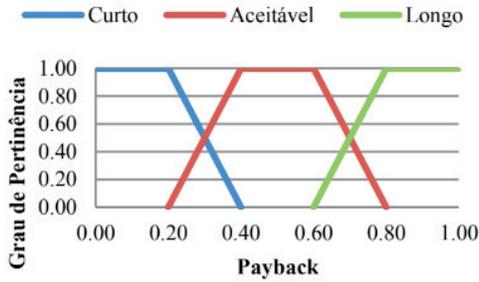


Fig. 13. Subconjuntos da variável *Payback*.

## 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.

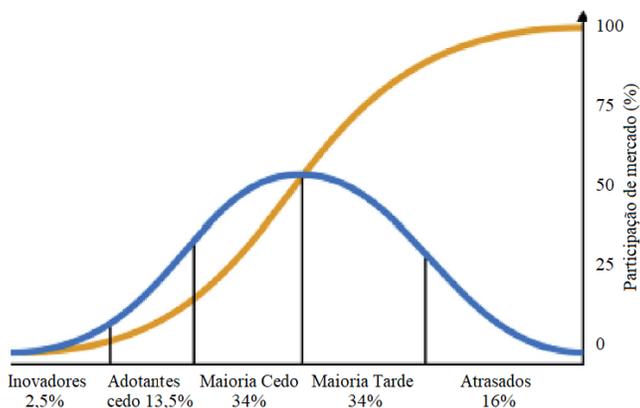


Fig. 14. Curvas de adoção da inovação.

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).

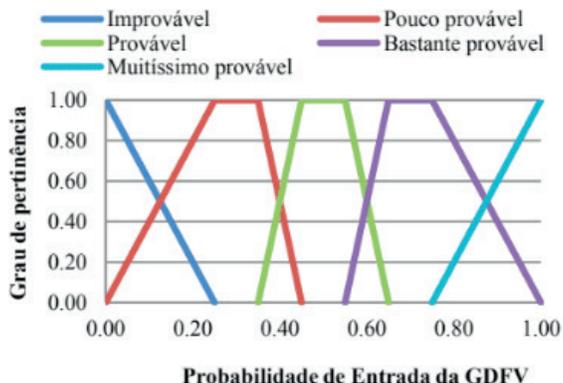


Fig. 15. Subconjuntos da Saída do SIF.

#### 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%.

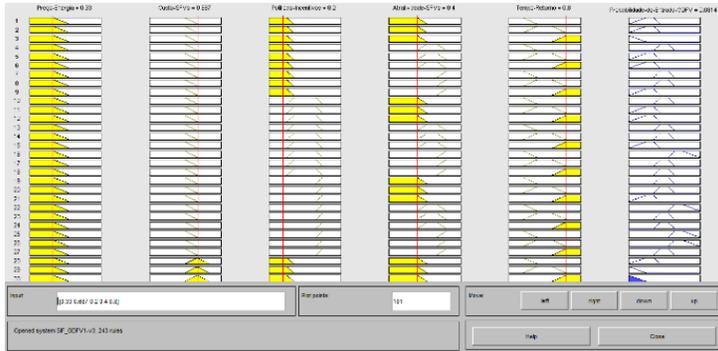


Fig. 16. Saída do SIF quando aplicadas condições desfavoráveis à GDFV.

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.

## 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