

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ivone Goulart Lopes – Instituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

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

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

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

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

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

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Linguística, Letras e Artes**

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

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. Alexandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa  
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein  
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza  
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social  
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA  
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia  
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis  
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lilians Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas  
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo  
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba  
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

## Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

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

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

E57 Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-5706-773-4  
DOI 10.22533/at.ed.734212202

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

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

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

## **APRESENTAÇÃO**

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

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **METODOLOGIA PARA TESTE E CLASSIFICAÇÃO DE SMART METERS PARA APLICAÇÕES EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Luiz Henrique Leite Rosa  
Renan Corrêa de Moura  
Marcio Ribeiro Cruz  
Carlos Frederico Meschini Almeida  
Nelson Kagan  
Alexandre Dominice

**DOI 10.22533/at.ed.7342122021**

### **CAPÍTULO 2..... 13**

#### **ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES**

Pedro Henrique Camargos  
Ricardo Elias Caetano  
Marcel Fernando da Costa Parentoni

**DOI 10.22533/at.ed.7342122022**

### **CAPÍTULO 3..... 25**

#### **COMO ATENUAR EMI EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS**

Rogério Martins de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.7342122023**

### **CAPÍTULO 4..... 39**

#### **MODELO MATEMÁTICO DE UMA TURBINA A GÁS DE 106 MW DE TIPO INDUSTRIAL COM UM ÚNICO EIXO**

Manuel Arturo Rendón Maldonado  
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

**DOI 10.22533/at.ed.7342122024**

### **CAPÍTULO 5..... 54**

#### **PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS - UMA ABORDAGEM USANDO SAMPLED VALUES**

Matheus Felipe Ayello Leite  
Arthur Augusto Pereira Cruz  
Angelo Cesar Colombini  
Márcio Zamboti Fortes  
Yona Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.7342122025**

### **CAPÍTULO 6..... 71**

#### **O USO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DIANTE DAS RECLAMAÇÕES POR DANOS ELÉTRICOS NO BRASIL**

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento  
Lilian de Fátima Costa Santos

Roberto Akira Yamachita  
Jamil Haddad  
Rodolfo Esmarady Rocha dos Santos  
Neiva Beatriz Ferreira Silva Vicentin  
Carlos Alberto Froés Lima

**DOI 10.22533/at.ed.7342122026**

**CAPÍTULO 7..... 83**

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DO HOSPITAL DE CLÍNICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Álvaro Ribeiro Gomes de Oliveira  
Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior  
Nivaldo Leite da Silva Júnior

**DOI 10.22533/at.ed.7342122027**

**CAPÍTULO 8..... 97**

**ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL**

Cássio Alves de Oliveira  
Josemar Alves dos Santos Junior  
Marcos José de Moraes Filho  
Vinícius Marcos Pinheiro  
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira  
Luciano Coutinho Gomes

**DOI 10.22533/at.ed.7342122028**

**CAPÍTULO 9..... 112**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA PARA PREVISÃO DE POTÊNCIA MÁXIMA EM SUBESTAÇÕES UTILIZANDO REDES NEURAIS**

Thommas Kevin Sales Flores  
Pedro Henrique Meira de Andrade  
Isaac Emmanuel Azevedo de Medeiros  
Juan Moises Mauricio Villanueva

**DOI 10.22533/at.ed.7342122029**

**CAPÍTULO 10..... 126**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA DISCRETA FRACIONÁRIA DE FOURIER E REDE NEURAL ARTIFICIAL**

Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento  
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti  
Antônio Carlos Duarte Ricciotti  
Adailton Braga Júnior  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira  
Júlio César Ribeiro

**DOI 10.22533/at.ed.73421220210**

<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>138</b>
<b>DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA COBERTURA DE APLICAÇÃO DE DEFENSIVO AGRÍCOLA USANDO MARCADORES ULTRAVIOLETA</b>	
Edson d'Avila Antônio Carlos Loureiro Lino Inácio Maria Dal Fabbro Ana Cristina da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220211</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>149</b>
<b>MODELAGEM E CONTROLE DE UM HELICÓPTERO DE BANCADA COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE</b>	
Matheus Sachet Rômulo Lira Milhomem	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220212</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>169</b>
<b>ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ESTUFAS HIDROPÔNICAS INTEGRADAS À IOT PARA FINS RESIDENCIAIS</b>	
Rogério Luis Spagnolo da Silva Renan Pinho Lucas Ramalho Paiva Jorge Augusto Igor Falla Henrique Alvarez	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220213</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>183</b>
<b>SEGMENTAÇÃO DE EXUDATOS DUROS USANDO LIMIAÇÃO ADAPTATIVA E CRESCIMENTO DE REGIÕES</b>	
Rafael de Freitas Brito Milena Bueno Pereira Carneiro Cristiane de Fátima dos Santos Cardoso	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220214</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>192</b>
<b>MICROGRID SYSTEM DESIGN BASED ON MODEL BASED SYSTEMS ENGINEERING: THE CASE STUDY IN THE AMAZON REGION</b>	
Miguel Angel Orellana Postigo José Reinaldo Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220215</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>208</b>
<b>ESTUDO COMPLEMENTAR DO USO DE UMA FONTE RESSONANTE PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM NÍVEIS DE MÉDIA TENSÃO</b>	
André Pinto Leão Maria Emília Lima Tostes João Paulo Abreu Vieira	

Ubiratan Holanda Bezerra  
Marcelo Costa Santos  
Ádrea Lima de Sousa  
Wesley Rodrigues Heringer  
Murillo Augusto Melo Cordeiro  
Juan Carlos Huaquisaca Paye  
Lucas de Paula Assunção Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.73421220216**

**CAPÍTULO 17.....224**

**FERRAMENTAS DE PROTOTIPAÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE POTÊNCIA:  
MATLAB VERSUS PYTHON**

Luciano de Oliveira Daniel  
Sergio Luis Varricchio

**DOI 10.22533/at.ed.73421220217**

**CAPÍTULO 18.....240**

**SENSIBILIDADES DE POLOS E ZEROS EM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE LINHAS  
DE TRANSMISSÃO REPRESENTADAS PELO MODELO DE BERGERON**

Sergio Luis Varricchio  
Cristiano de Oliveira Costa

**DOI 10.22533/at.ed.73421220218**

**CAPÍTULO 19.....256**

**UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS COM  
MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL**

Eloisa Bento Sarmento  
Mariana Gomes Costa  
Gileno Bezerra Guerra Junior  
Helder Alves Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.73421220219**

**CAPÍTULO 20.....264**

**PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS DE MICROFITA QUASE-  
FRACTAL UTILIZANDO A CURVA DE MINKOWSKI NÍVEL 2 COM APLICAÇÕES EM  
REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira  
Pedro Carlos de Assis Júnior  
Relber Antônio Galdino de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.73421220220**

**CAPÍTULO 21.....277**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DAS IMPRECIÇÕES NUMÉRICAS  
RESULTANTES DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS COM ARITMÉTICA INTEIRA**

Daniel Carrijo Polonio Araujo  
Gabriel de Souza Pereira Gomes  
Christos Aristóteles Harissis  
Rogério Andrade Flauzino

**DOI 10.22533/at.ed.73421220221**

<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>298</b>
<b>TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA</b>	
Marcelo Nogueira Tirolli	
Alexandre Borges Marcelo	
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220222</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>312</b>
<b>A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS</b>	
Gabriel de Souza Pereira Gomes	
Daniel Carrijo Polonio Araujo	
Mateus Batista de Moraes	
Rafael Prux Fehlberg	
Murilo Marques Pinto	
Arthur Franklim Marques de Campos	
Marcos Eduardo Guerra Alves	
Rogério Andrade Flauzino	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220223</b>	
<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>325</b>
<b>LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO</b>	
Mayara Helena Moreira Nogueira dos Santos	
Matheus Felipe Ayello	
Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro	
André da Costa Pinho	
Angelo Cesar Colombini	
Márcio Zamboti Fortes	
Yona Lopes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220224</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>343</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>344</b>

## UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DAS IMPRECIÇÕES NUMÉRICAS RESULTANTES DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS COM ARITMÉTICA INTEIRA

Data de aceite: 04/02/2021

**Daniel Carrijo Polonio Araujo**

Univ. de São Paulo - USP, SP  
<https://orcid.org/0000-0002-0757-4643>

**Gabriel de Souza Pereira Gomes**

Radice Tecnologia, Atibaia, SP  
<https://orcid.org/0000-0002-9808-8033>

**Christos Aristóteles Harissis**

Treetech Sistemas Digitais, Atibaia, SP  
<https://orcid.org/0000-0001-7071-7400>

**Rogério Andrade Flauzino**

Univ. de São Paulo - USP, SP  
<https://orcid.org/0000-0003-3020-7582>

**RESUMO:** Em aplicações<sup>1</sup> de processamento digital de sinais a filtragem de sinais é uma tarefa essencial, principalmente quando lidamos com ruídos e malformações inerentes aos sinais observados. Neste campo específico, a filtragem pode ser feita utilizando-se de diversos algoritmos, tanto em aritmética inteira quando em aritmética real. O objetivo desse artigo é propor duas abordagens inovadoras para os problemas comuns de filtragem quando o cálculo é realizado com inteiros, mitigando assim as suas consequências, que muitas vezes não são percebidas pelos projetistas ou programadores podendo causar erros inesperados ao processo de filtragem, e conseqüentemente, ao resultado final da aplicação. A análise é realizada sobre

um filtro “*Single Pole*” passa-baixa, consagrado pela literatura e muito utilizado em diversas áreas da engenharia, desde Sistemas de Potência à Biomédica.

**PALAVRAS - CHAVE:** DSP; Filtro Passa-Baixa; Filtro com Inteiros; Aritmética Inteira; Filtro IIR.

**ABSTRACT:** In digital signal processing applications, filtering is an essential task, especially when dealing with noise and malformations inherent to the signals. In this specific field, filtering can be done using several algorithms, both in integer (fixed-point) arithmetic and in real (floating-point) arithmetic. The objective of this article is to propose two innovative approaches to common filtering problems when calculating using integers, thus mitigating their consequences, which are often not perceived by designers or programmers, causing non expected errors the filtering process and, consequently, to the final result of the application. The analysis is performed on a “*Single Pole*” low-pass filter, enshrined in the literature and widely used in several fields of engineering, from Power Systems to Biomedical ones.

**KEYWORDS:** DSP; Low-Pass Filter; Fixed-Point Filter; Integer Arithmetic; IIR Filter.

### 1 | INTRODUÇÃO

Com a popularização de dispositivos digitais portáteis, é cada vez mais importante o baixo consumo de energia aliado ao baixo custo de projeto. Existem outras aplicações onde os

<sup>1</sup> A pesquisa e seus pesquisadores foram financeiramente suportados pela Treetech e Radice, em parceria com a SEL-EESC-USP.

requisitos de energia ou custo não são fundamentais, mas temos requisitos muito exigentes de carga de processamento ou tempo de reposta. O requisito de processamento pode estar ligado, por exemplo, ao fato de o processador estar ocupado com uma grande quantidade de tarefas que não podem ser excluídas ou reduzidas. Por último, sistemas de tempo real baseados em microcontroladores tem requisitos exigentes de processamento, tempo de resposta e baixo custo.

Plataformas de processamento de sinais com aritmética inteira (ponto fixo ou *fixed-point*), são tipicamente mais eficientes em energia e menos dispendiosas do que as alternativas de aritmética real (ponto flutuante ou *floatingpoint*), graças a utilização de circuitos integrados mais simples, com baixo consumo de potência e ausência de FPU (*Floating-Point Unit* ou Unidade de Ponto Flutuante). Ademais, apesar da constante diminuição do custo de circuitos integrados com FPU, estes ainda são mais caros que os circuitos com somente aritmética inteira. Contudo, os filtros com aritmética inteira são geralmente mais difíceis de projetar.

O projeto dos filtros nasce naturalmente utilizando-se números reais, tanto para a definição dos seus coeficientes quanto para o processamento do sinal de entrada. Por isso, quando possível, é melhor implementar um filtro utilizando-se aritmética real. Contudo, existem rotinas que possuem exigentes restrições no tempo de execução, e a filtragem costuma estar entre elas. Considerando esse fator, a realização de aritmética real ocasiona em um grande comprometimento de processamento e a não garantia da entrega do resultado em tempo hábil. É sabido que a filtragem seria naturalmente mais veloz se realizada com inteiros.

O uso de inteiros resulta muitas vezes no desprezo da parte não inteira resultante das operações. Este procedimento causa um erro que influencia todas as operações subsequentes. Mesmo que o erro máximo resultante da imprecisão do cálculo inteiro seja tolerado, este erro ao longo da sequência de cálculo pode tornar o sistema de filtragem instável, podendo produzir resultados errados em sua saída. Ao se projetar filtros totalmente com inteiros (onde tanto os coeficientes do filtro quanto o processamento do sinal são realizados em inteiros), deve-se atentar alguns problemas inerentes, como o estouro das variáveis inteiras (*overflow*), a quantização dos coeficientes do filtro e do sinal de entrada, segundo Baranowski et al. (2016).

O erro de truncamento (*round-off*) com um sinal de entrada no limiar de detecção é um erro comumente negligenciado pelos projetistas, já que se poderia contar que a entrada nunca alcance este nível ou mecanismos de ganho possam ser inseridos para mitigar esta causa. Nesta forma, o erro de truncamento gera uma espécie de ruído (*roundoff noise*), que se não tratado pode ocasionar deformação do sinal de saída, indo do imperceptível a inutilização total do sinal tratado pelo filtro, conforme apresentado por Prandoni and Vetterli (2008). Para os filtros classe IIR (Infinite Impulse Response), este problema é muito mais grave que para os classe FIR (Finite Impulse Response).

Na tentativa de resolver este e outros problemas de filtragem utilizando-se de inteiros, o objetivo de trabalho é pontuar esses erros que não costumam ser percebidos e propor soluções inovadoras para evitá-los, utilizando como exemplo um filtro “*single-pole*” passa-baixa, consagrado pela literatura e amplamente utilizado em diversas áreas, conforme mostrado em Smith et al. (1997), submetendo-o a dois sinais de entrada, sendo o primeiro uma onda retangular e o segundo uma onda senoidal com amplitudes variáveis, ambos com diferentes constantes de filtragem.

Neste trabalho serão abordados apenas filtros de primeira ordem. Apesar dos filtros de primeira ordem terem óbvias limitações no resultado do sinal filtrado, esta escolha se deve ao fato de que filtros de primeira ordem abrangem uma grande gama de problemas práticos com aplicação imediata, em especial quando velocidades altas de processamento são requeridas. Além disto, ordens superiores equivalentes podem ser obtidas com o cascadeamento (iteração) do filtro de primeira ordem. Filtros de ordem superiores utilizando-se os métodos aqui apresentados serão apresentados e terão seu desempenho avaliado em trabalho futuro.

Nas próximas seções serão apresentados os problemas abordados e as soluções propostas. Na segunda seção, será apresentada uma resumida retrospectiva geral do projeto de filtros com inteiros, as suas implicações e desafios. Na terceira seção serão apresentados os fundamentos básicos de um filtro *single pole*, bem como sua implementação na forma recursiva. Na quarta seção serão apresentados os problemas que serão abordados e suas consequências em cada caso específico. Na quinta seção serão apresentadas as soluções para os problemas e sua forma de implementação. Na sexta seção serão realizadas a análise dos resultados. Por fim, na sétima e última seção será apresentada a conclusão deste trabalho.

## 2 | DESAFIOS DO PROJETO DE FILTROS COM ARITMETICA INTEIRA

O projeto de filtros para processamento de sinais sempre foi um assunto muito debatido desde o início da eletrônica analógica, e passou por uma revolução com a chegada da era digital. Far-se-á uma breve abordagem do projeto destes filtros na era digital, com foco nos DSPs.

Usualmente, para projetar um filtro de ponto fixo, primeiramente é projetado um filtro de ponto flutuante, também conhecido como filtro de referência, que atenda e exceda aos requisitos finais. O excesso de margem garante uma conversão suave de uma representação de ponto flutuante para uma representação de ponto fixo. O próximo passo é modificar o filtro de ponto flutuante para acomodar as restrições de aritmética inteira enquanto ainda tenta atender aos requisitos. Sobre a definição dos melhores coeficientes inteiros para filtros IIR, este se apresenta como um problema matemático de difícil solução e não existe literatura significativa sobre o tema. Para os coeficientes de filtros FIR, um

pouco menos complexos, existem artigos de referência, tais como Kodek (1980) e Kodek and Steiglitz (1981).

Filtros IIR com inteiros são comumente implementados em DSPs (*Digital Signal Processors*), FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*) e ASICs (*Application-Specific Integrated Circuit*). Um filtro com inteiros usa aritmética inteira e é representado por uma equação com coeficientes inteiros. Se o acumulador e a saída do filtro IIR não tiverem bits suficientes para representar seus dados, ocorrerá estouro e distorcerá o sinal de saída.

O objetivo de um projeto de filtro IIR de ponto fixo é maximizar o desempenho do filtro e minimizar os efeitos da aritmética inteira Ott et al. (2019). Converter um filtro de ponto flutuante em ponto fixo pode alterar significativamente as características e o desempenho do filtro Bauer and S lowik (2017). A aritmética inteira tem diversos efeitos prejudiciais, dentre os quais, segundo Antoniou (2016), o que mais afeta o projeto dos filtros IIR é o da quantização indevida dos dados, resultando em estouros ou saída zero. Erros de arredondamento aritmético resultam de aritmética imprecisa, o que, por sua vez, reduz a precisão, devido ao acúmulo de vários erros sucessivamente ocorridos em um filtro. Além disso, a aritmética com inteiros pode levar a restrições na frequência de corte, restringindo os valores que ela pode assumir ao se construir o filtro idealmente previsto. Projetar e implementar filtros digitais IIR robustos, com a metodologia de números inteiros, é um constante desafio para projetistas.

### 3 | FILTRO SINGLE-POLE

Conforme Oppenheim (1999), o filtro *single-pole* é um filtro IIR originado de uma digitalização por invariância da resposta ao impulso de filtros analógicos RC (passa-altas ou passa-baixas) de primeira ordem. Tomemos, como exemplo, o filtro de primeira ordem que tem seu circuito analógico dado pela Figura 1, cuja função de transferência é dada por (1).

$$H(s) = \frac{1}{RCs+1} \quad (1)$$

que é escrita em termos da frequência de corte  $f_c = (2\pi RC)^{-1}$  como

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2\pi f_c}{s+2\pi f_c} \quad (2)$$

cuja resposta contínua ao impulso é

$$h(t) = 2\pi f_c e^{-2\pi f_c t} \quad (3)$$

que corresponde a equação (4):

$$h[n] = 2\pi f_c e^{-2\pi n f_c n} \quad (4)$$

em um sistema discreto. A transformada Z da equação (4) é dada por:

$$H_K(z) = \frac{2\pi f_c}{1 - z^{-1} e^{-2\pi f_c n}} \quad (5)$$

A equação (5) é também a função de transferência no domínio discreto, a menos de uma constante ( $H(z) = K H_K(z)$ ). Deve-se, portanto, fazer a correção impondo que a resposta DC ( $f = 0 \leftrightarrow z = 1$ ) do filtro passa-baixas tenha ganho unitário  $H(z)|_{z=1} = 1$ , sendo assim finalmente temos a função de transferência do filtro *singlepole* passa-baixas:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1 - e^{-2\pi f_c n}}{1 - z^{-1} e^{-2\pi f_c n}} \quad (6)$$

e sua respectiva equação de diferenças:

$$y[n] = (1 - e^{-2\pi f_c n}) x[n] + e^{-2\pi f_c n} y[n - 1] \quad (7)$$

Podemos simplificar a equação (7) fazendo  $(1 - e^{-2\pi f_c n}) = \frac{1}{K_f}$ , assim sendo a equação de diferenças se torna:

$$y[n] = \frac{x[n]}{K_f} + y[n - 1] - \frac{y[n-1]}{K_f} \quad (8)$$

Onde  $K_f$  será chamada de constante ou ganho do filtro para fins de análise posterior. A partir da equação anterior, é possível ver que o filtro é implementado de forma recursiva. Desse modo, a saída atual depende de uma soma de pesos entre a saída anterior e a entrada atual. A resposta em frequência e a resposta de fase do filtro *single-pole* passa-baixa pode ser visualizada na figura 2. Desta análise, destacam-se dois pontos: Primeiro, que um filtro *single-pole* de um único estágio possui uma atenuação de 20db/dec. Segundo, seu ganho DC é unitário, imposto pela normalização realizada em (6).

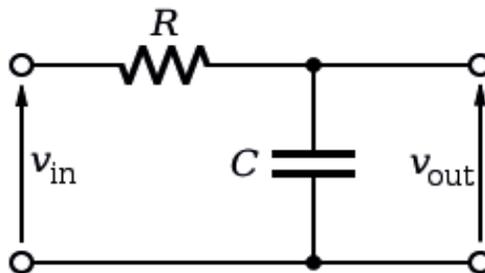


Figura 1. Circuito passa-baixas de primeira ordem

## 4 | PROBLEMAS DA FILTRAGEM UTILIZANDO APENAS VARIÁVEIS DO TIPO INTEIRO

### 4.1 Problema 1: Numeradores menores que os denominadores

Para entendermos os problemas impostos pela aritmética baseada em inteiros, analisemos a equação (8). Os termos  $\frac{x[n]}{K_f}$  e  $\frac{y[n-1]}{K_f}$  resultarão em zero sempre que os valores de  $y[n-1]$  e  $x[n]$  forem menores que a constante do filtro ( $K_f$ ). Para sinais com amplitude baixa ou amplitude comparada a amplitude do ganho do filtro, esse fato produzirá um sinal de saída totalmente diferente do esperado. Para entendermos tal problema, analisemos a figura 3. Podemos perceber que o ganho do filtro foi definido como  $K_f = 3$ , uma unidade maior que a amplitude do sinal. Devido ao fato de que o ganho do filtro é maior que a amplitude do sinal, a saída resultou em zero, uma vez que as parcelas fracionárias resultaram sempre em zero. Isso acontecerá para qualquer sinal sempre que o valor máximo da entrada for menor que o valor da constante do filtro utilizada. Se, por exemplo, utilizarmos uma entrada composta por um sinal senoidal e um ganho de filtro maior que o máximo valor da entrada, o mesmo resultado ocorrerá. Isso pode ser visto na figura 4.

Tal problema é crítico, uma vez que a dinâmica da entrada pode implicar muitas vezes em sinais de entrada com valores menores que a constante do filtro. À medida que a amplitude do sinal de entrada aumenta e sua ordem de grandeza se aproxima da ordem de grandeza da constante do filtro, esse problema diminui, fazendo com que a saída seja zero apenas quando a entrada e a realimentação do filtro forem menores que a constante do mesmo filtro. Na figura 5, podemos ver o agravamento desse problema para vários valores de constante do filtro. A medida que se aumenta a constante do filtro, mais a resposta em aritmética inteira desvia-se da resposta em aritmética real devido aos problemas do truncamento.

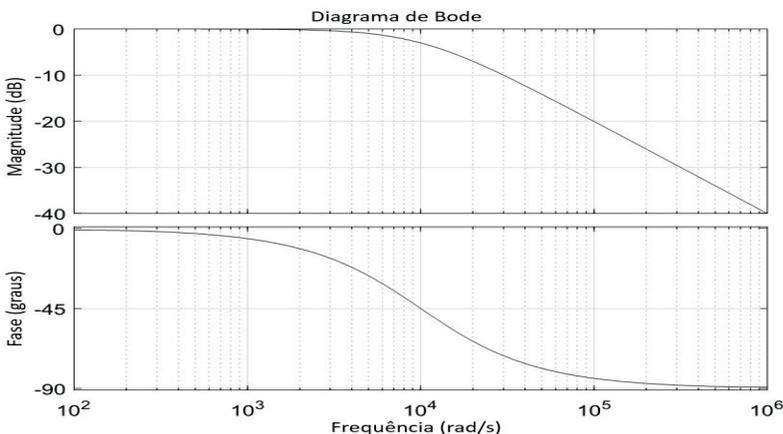


Figura 2. Resposta em frequência do filtro *single-pole* passa-baixa

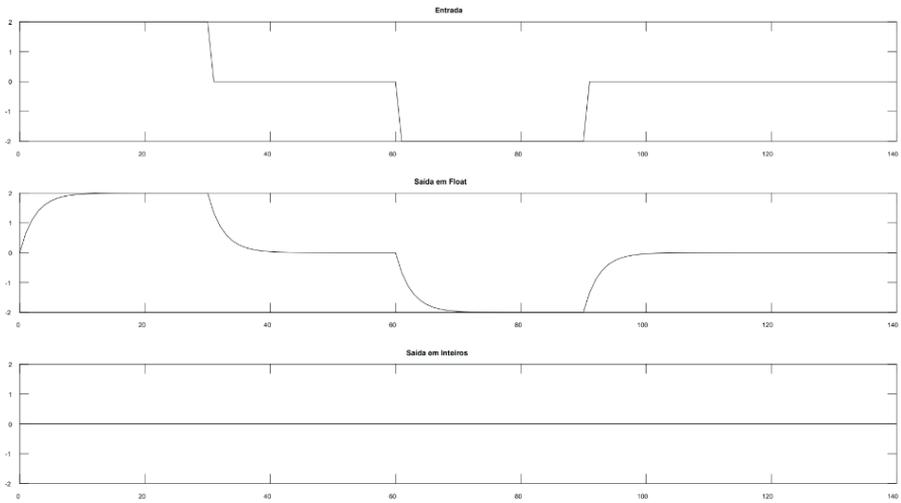


Figura 3. Numeradores menores que os denominadores Sinal Quadrado

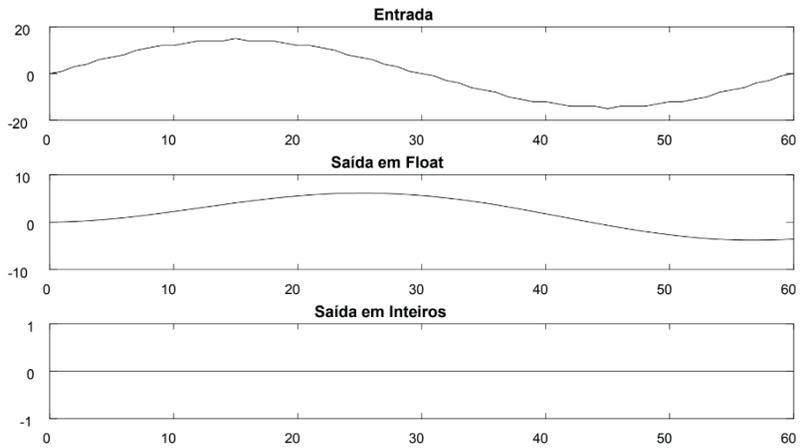


Figura 4. Numeradores menores que os denominadores Sinal Senoidal

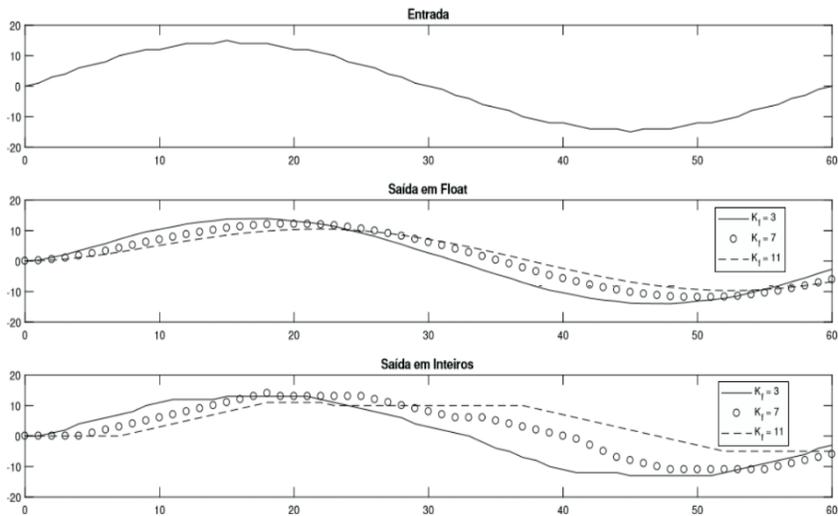


Figura 5. Numeradores menores que os denominadores vários valores de constante do filtro

## 4.2 Problema 2: Ponto de estabilização do filtro diferente do ponto de estabilização da entrada

Um outro fato crítico causado pelo truncamento no cálculo apenas com inteiros é que o ponto de estabilização do filtro pode se tornar diferente do ponto de estabilização do sinal, que é o mesmo ponto de estabilização do resultado da filtragem em aritmética real. Isso acaba por inviabilizar muitas análises, como por exemplo a análise de “ZeroCrossing”. Um exemplo de estabilização em um ponto

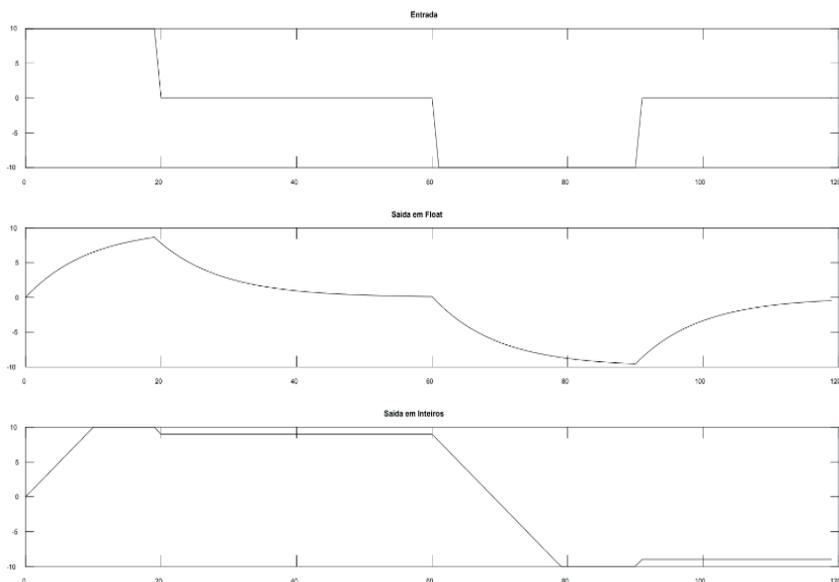


Figura 6. Problema de não estabilização no ponto adequado

diferente pode ser verificado na figura 6. Para realização da filtragem, o valor de  $K_f$  utilizado foi igual a “dois”. Devido aos problemas do truncamento na forma de onda de saída do filtro com inteiros, é praticamente impossível identificar a passagem por zero do sinal filtrado. Além disso o resultado ficou bem distante da filtragem calculada em *floating-point*, perdendo boa parte das características de forma.

## 5 | SOLUÇÕES PARA PROBLEMAS DE TRUNCAMENTO

### 5.1 Método 1: Ganho Quadrático

Consideremos algumas observações feitas na seção anterior: Quanto mais o valor máximo da entrada se aproxima ou ultrapassa o ganho do filtro, menos o efeito do truncamento é percebido. Partindo desse princípio, podemos multiplicar a entrada pela constante  $K_f$  do filtro, de modo que para qualquer valor maior ou igual a 1, a entrada dividida pelo ganho do filtro sempre resultará em um valor diferente de zero. Assim sendo, a equação (8) pode ser reescrita como:

$$y[n] = x[n] + y[n - 1] - \frac{y[n-1]}{K_f} \quad (9)$$

Com essa multiplicação, conseguimos resolver o problema da divisão da entrada resultar em zero, o que faz com que a saída do filtro não seja nula (para uma entrada

diferente de zero), conforme mostrado nas figuras 4 e 5. Todavia, podemos perceber que ainda teremos o problema da estabilização em um valor diferente do esperado, uma vez que a realimentação dividida pelo ganho do filtro pode implicar em um valor constante. Assim sendo, para evitar esse problema, podemos multiplicar novamente a entrada por  $K_f$  de modo a evitar que a realimentação estabilize em um valor constante. De tal modo, a equação (9) se tornará:

$$y[n] = K_f x[n] + y[n - 1] - \frac{y[n-1]}{K_f} \quad (10)$$

Para analisarmos a validade do método, consideremos as figuras 4 e 6 agora aplicadas com a nova equação resultando nas figuras 7 e 8. Como pode ser visto nas simulações, ambos os problemas foram resolvidos de fato. Porém, um outro problema foi inserido. O ganho DC do filtro deixou de ser unitário e passou a ser  $K_f^2$  vezes o ganho DC do filtro padrão. Outro problema criado é que se a amplitude do sinal e o ganho forem muito grandes, a

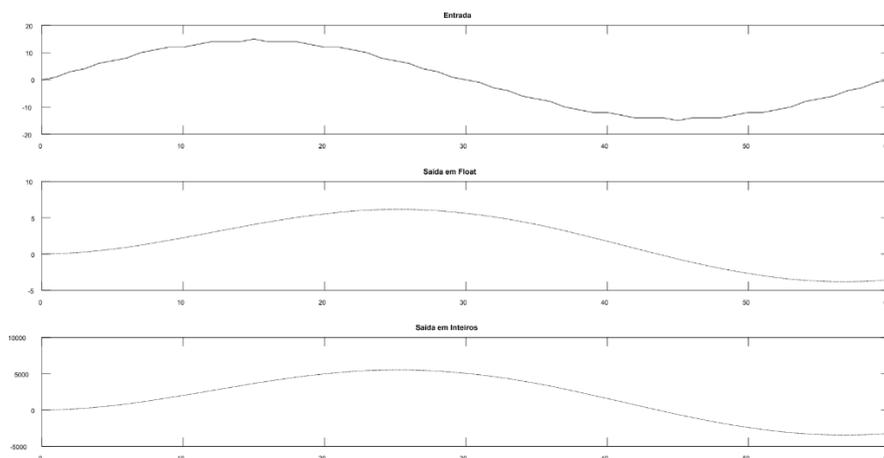


Figura 7. Problema de saída nula resolvida pelo método

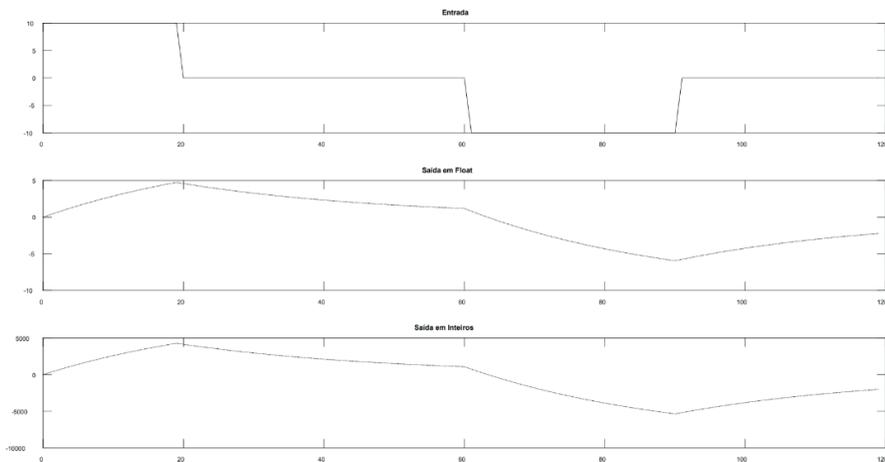


Figura 8. Problema de não estabilização no ponto adequado resolvido pelo método

filtragem poderá resultar em um *overflow* da variável de saída do filtro. Por exemplo, se considerarmos a constante do filtro  $K_f = 30$  e o valor máximo da amplitude igual a “1000” (o que estaria de acordo considerando uma escala completa de um conversor AD de 10 bits) poderíamos esperar valores da ordem de centenas de milhares. Se considerarmos que a variável de saída do filtro poderia ser uma variável do tipo int16 (inteiro de 16 bits), cujo a máxima representação seria 65535 em uma operação não sinalizada, essa variável teria sofrido um *overflow*. Se o objetivo é encontrar o ponto de passagem por zero de um sinal ou algo diretamente ligado a forma de onda em si e não o valor de sua amplitude, o problema do ganho DC não unitário não influenciará. Todavia, se a amplitude do sinal for um fator importante, será necessário a realização de um outro ajuste. Após o cálculo de cada amostra de saída do filtro, o resultado deverá ser dividido por  $K_f^2$  e estocado em outra variável que será a saída de ganho DC unitário. A filtragem então será composta por duas equações, a equação (10) adicionada da equação da saída com ganho DC unitário, que será:

$$y_{DC}[n] = \frac{y[n]}{K_f^2} \quad (11)$$

É importante salientar que o valor realimentado na equação de filtragem continua sendo  $y[n-1]$  e não  $y_{DC}[n-1]$ . Como o truncamento é mais uma vez realizado, a saída ficará quantizada de uma maneira mais notória, uma vez que a faixa de amplitude da saída diminuirá e por consequência o número de “*quantums*” que a compõe, conforme pode ser vista na figura 9. Podemos verificar que a forma de onda deformou-se, todavia não existe mais o problema do ganho DC unitário. Ainda possuímos o problema do *overflow* da

primeira saída do filtro. Portanto,

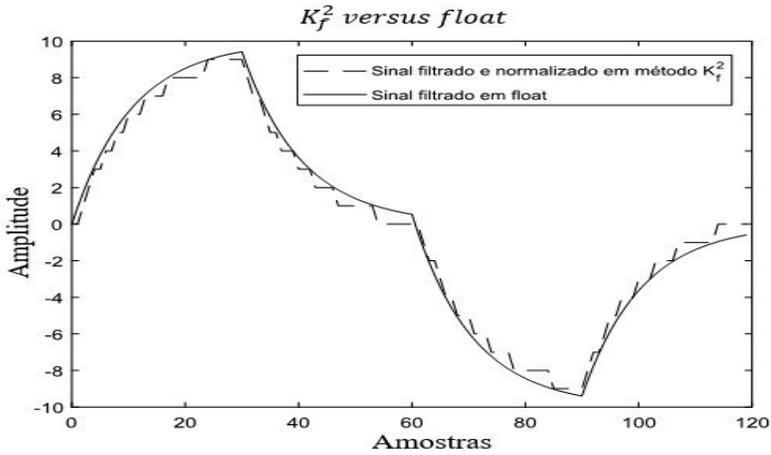


Figura 9. Saída do filtro Ganho Quadrático normalizado e do filtro em *floating-point*

ao utilizar esse método é interessante ter cuidado com os valores máximos aceitos pela variável de saída. Para o caso exemplificado anteriormente, o ideal seria a utilização de uma variável de saída do tipo int32 (inteiro de 32 bits). O algoritmo para implementação do método é direto, basta multiplicar a entrada por  $K_f^2$  e realizar a filtragem normalmente. Caso deseje-se um valor normalizado, dividir a saída do filtro pela constante do filtro  $K_f^2$  e estocar em outra variável. Na figura 10 é representado o fluxograma do algoritmo de implementação do método.

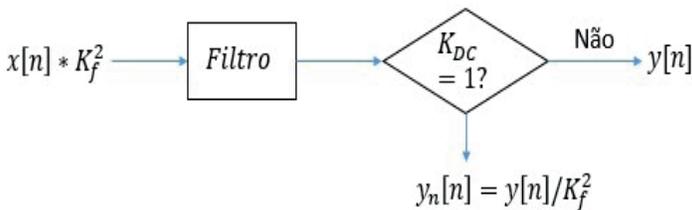


Figura 10. Fluxograma Algoritmo Ganho Quadrático

## 5.2 Método 2: “Soma Triangular”

O segundo método a ser apresentado pode ser representado pela equação abaixo:

$$y[n] = y[n - 1] - \frac{y[n-1] - x[n] + K_f K_c (-1)^n}{K_f} + K_c (-1)^n \quad (12)$$

O método “Soma Triangular” consiste na soma de um “ganho” multiplicado por (-1) elevado ao índice da amostra, o que implica em somas e subtrações de  $K_f K_c$ . Se analisarmos a equação (12) do ponto de vista de uma aritmética operada com ponto flutuante, essa equação é idêntica a equação (8). Todavia, do ponto de vista de inteiros, a equação é bem diferente. O fato de se somar um valor antes de operar a divisão central da equação faz com que essa divisão tenda a não convergir para zero e não estabilizar em um valor diferente do esperado. Para que esse método de fato tenha efeito, é necessário que o produto entre o “Soma Triangular”  $K_c$  e o ganho do filtro  $K_f$  seja igual ou maior ao máximo valor da entrada, de modo que o numerador dessa divisão tenda a não ser, em módulo, um número menor que  $K_f$ . A saída devido ao truncamento também é quantizada, assim como no caso do método anterior. As Figure 11, 12 mostram uma aplicação do método do “Soma Triangular” para as duas entradas:

Pela figura 12, é possível perceber que a resposta do

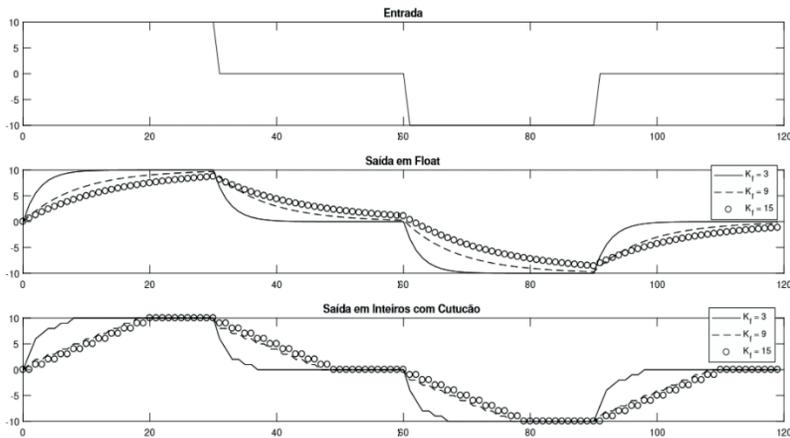


Figura 11. Resposta do filtro com Soma Triangular para valores diferentes de  $K_f$  com entrada retangular

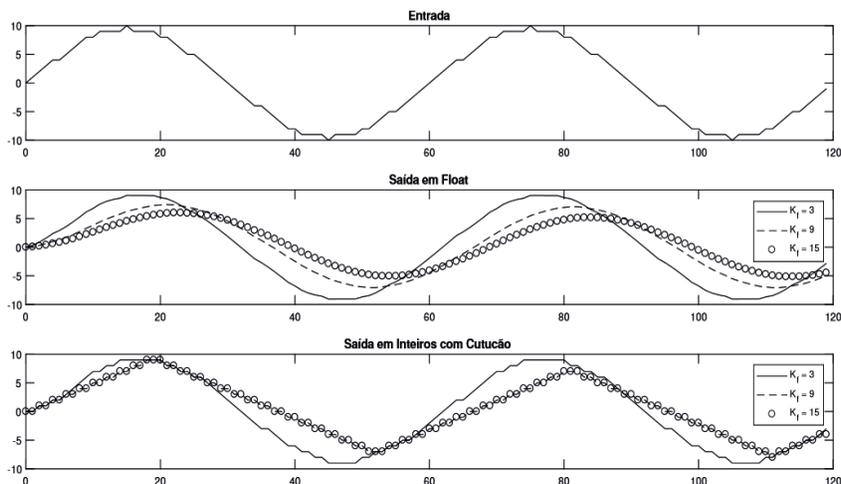


Figura 12. Resposta do filtro com Soma Triangular para valores diferentes de  $K_f$  com entrada senoidal

filtro com Soma Triangular para  $K_f = 9$  e  $K_f = 15$  é a mesma. Isso ocorre porque à medida que o ganho do filtro ultrapassa o máximo valor da entrada, a saída pelo método do “Soma Triangular” não sofre alteração significativa. Para resolver o problema da estabilização da saída acima exposto, podemos seguir de um modo semelhante ao feito no método do Ganho Quadrático, multiplicando  $x[n]$  por  $K_f$  e depois dividindo a saída atual por  $K_f$  estocando em uma variável de saída diferente. Assim obteremos uma saída com ganho DC unitário e outra saída com ganho DC diferente de unitário, e um filtro composto de duas equações, conforme visto no método anterior. Assim sendo, as duas equações serão:

$$y[n] = y[n - 1] - \frac{y[n-1] + K_f K_c (-1)^n}{K_f} + x[n] + K_c (-1)^n \quad (13)$$

$$YDC[n] = \frac{y[n]}{K_f} \quad (14)$$

Assim, a resposta com ganho DC unitário do filtro com Soma Triangular se transformará conforme a figura 13. O algoritmo para implementação do mesmo é bem semelhante a do método do Ganho Quadrático, com mudanças na equação do filtro e no fato de que agora a entrada não será mais multiplicada  $x[n]$  por  $K_f$ , uma vez que a equação do filtro foi alterada, e a saída será dividida por  $K_f$  e não

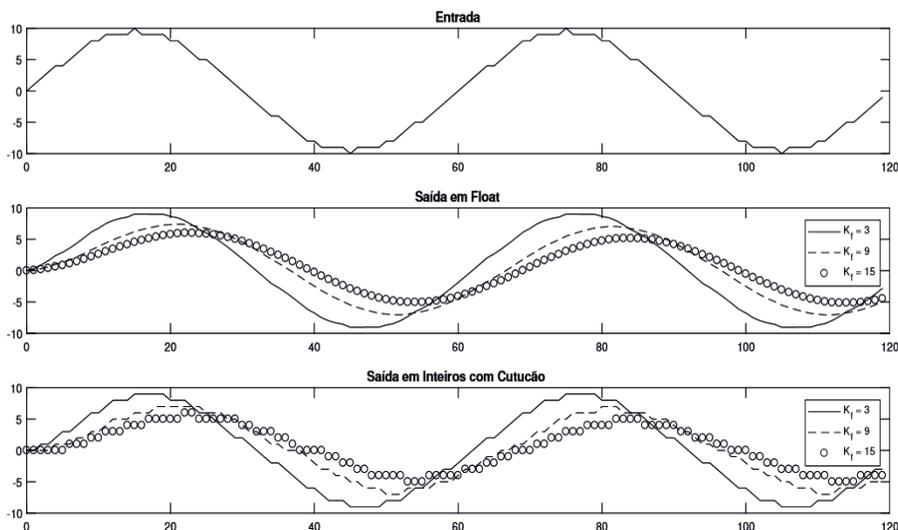


Figura 13. Resposta do filtro com Soma Triangular para valores diferentes de  $K_f$  com entrada senoidal normalizado por  $K_f$

mais por  $K_f^2$  conforme pode ser visto no fluxograma da figura 14.

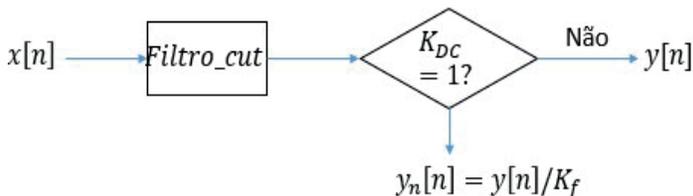


Figura 14. Fluxograma Algoritmo Soma Triangular

### 5.3 Método 3: Resto Cumulativo

O último método a ser apresentado é chamado de resto cumulativo, que consiste em acumular o resto das divisões e dividi-los novamente assim que eles ultrapassarem o valor do ganho do filtro, e então somar ou subtrair “um” da próxima saída do filtro. Desse modo, diminui-se o erro ao longo da filtragem, porque o resto não é desprezado. A equação do filtro para o resto cumulativo pode ser visualizado abaixo:

$$y[n] = y[n - 1] - \frac{y[n-1]-x[n]}{K_f} + \frac{Acc}{K_f} \quad (15)$$

Onde o valor Acumulado é igual a:

$$Acc = rem(y[n-1] - x[n], K_f) + rem(Acc_a, K_f) \quad (16)$$

Onde “rem (a, b)” é o resto da divisão de “a por b” e “Acc<sub>a</sub>” é o resto acumulado da divisão anterior. Nas figuras abaixo é possível ver a resposta desse método para dois tipos de entrada e três ganhos diferentes de filtro: O algoritmo para implementação do método pode ser visualizado no fluxograma da figura 17. Os passos desse algoritmo iniciam-se com o cálculo do valor acumulado atual, que é composto pelo resto da divisão da realimentação subtraídas da entrada atual pela constante do filtro, somada ao resto da divisão do acumulado atual pela constante do mesmo filtro. Após isso, proceder a filtragem conforme a equação (16).

## 6 | ANÁLISE DE RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Para analisar os resultados e realizar comparações entre os métodos, será utilizado como referência de comparação o cálculo em *floating-point*, que é a maneira ideal de realizar as filtrações do ponto de vista matemático, e os

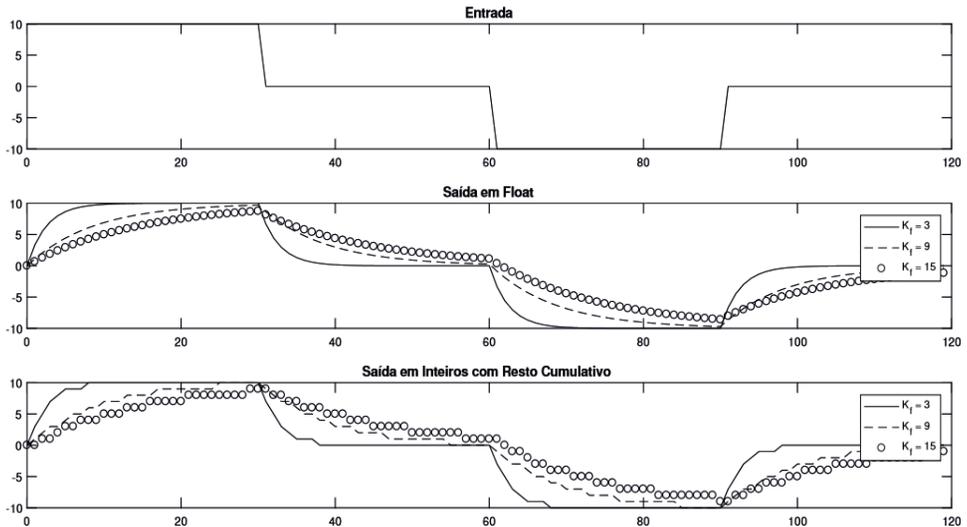


Figura 15. Resposta do filtro com Resto Acumulativo para valores diferentes de  $K_f$  com entrada retangular

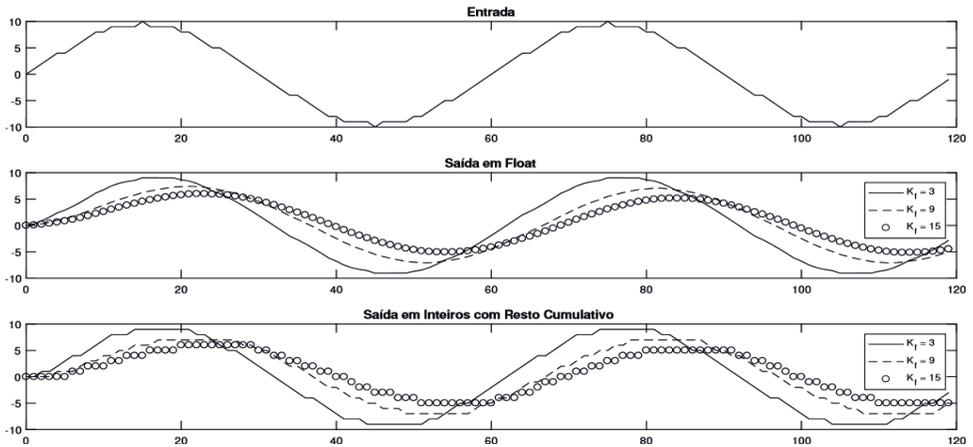


Figura 16. Resposta do filtro com Resto Acumulativo para valores diferentes de  $K_f$  com entrada senoidal

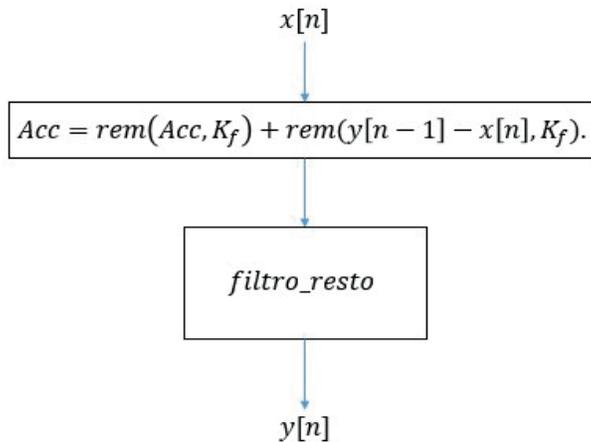


Figura 17. Fluxograma Algoritmo Resto Acumulativo

demais cálculos serão então comparados a este por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson, mostrado na equação abaixo:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

Onde  $\bar{x}$  é a média da primeira base de dados e  $\bar{y}$  é a média da segunda base de dados as quais estão sendo comparadas. Esse coeficiente indica o quanto as variações nos dois bancos de dados estão relacionados através de uma regressão linear. Quanto

mais próximo de “1”, mais correlacionados estão os dados e por consequência mais suas formas se parecem. Para as análises de comparação, serão utilizadas as duas entradas dos exemplos anteriores e três valores de ganho do filtro. Os três métodos propostos e o modo sem modificação serão comparados a resposta do filtro calculado em *floating-point*. As figuras 18 e 19, em conjunto com a tabela 1 apresentam essas comparações.

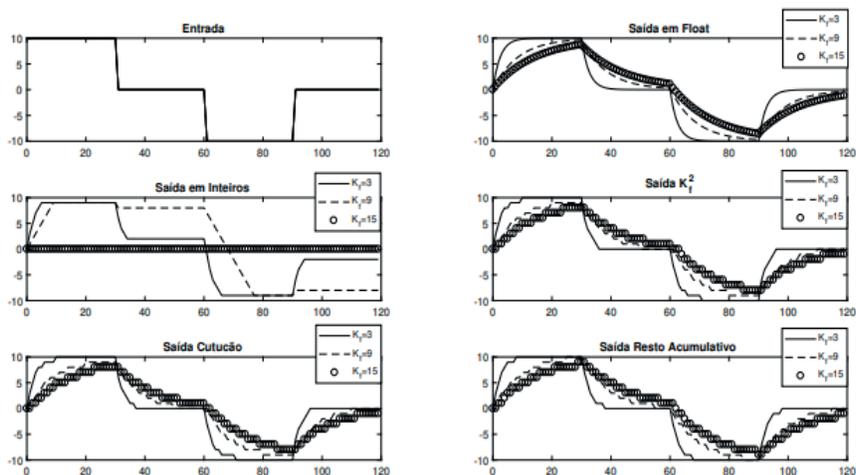


Figura 18. Resposta de todos os métodos para uma entrada retangular para  $K_f = 3$ ,  $K_f = 9$ ,  $K_f = 15$

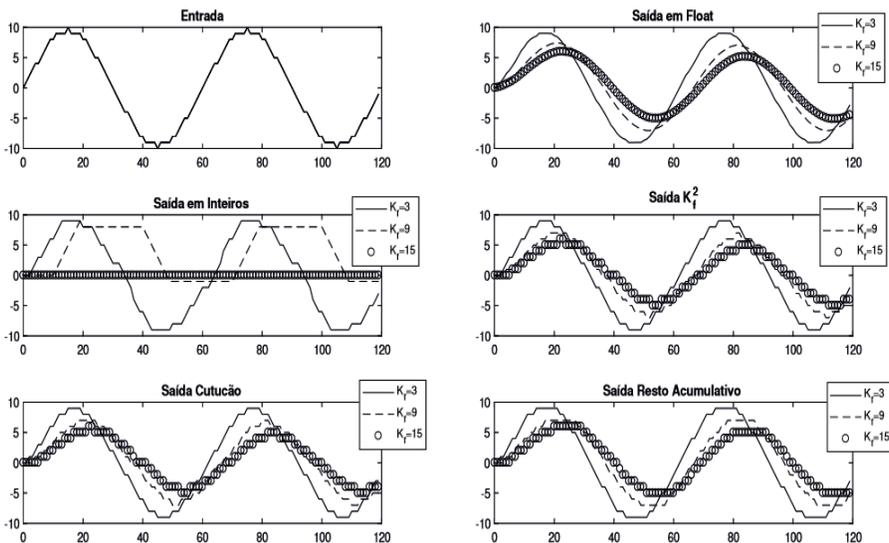


Figura 19. Resposta de todos os métodos para uma entrada senoidal para  $K_f = 3$ ,  $K_f = 9$ ,  $K_f = 15$

Método	$K_f = 3$	$K_f = 9$	$K_f = 15$
Inteiros	0,9800   0,9928	0,8038   0,6323	0,0000   0,0000
Ganho Quadrático	0,9993   0,9986	0,9977   0,9967	0,9974   0,9945
Soma Triangular	0,9993   0,9988	0,9976   0,9969	0,9975   0,9945
Resto Acc	0,9960   0,9813	0,9859   0,9711	0,9725   0,9721

Tabela 1. Coeficientes de Correlação:  
Método X Ganho do Filtro X Tipo de Entrada

Através das figuras 18 e 19, em conjunto com a tabela 1, podemos perceber que o filtro *single-pole* utilizando inteiros não apresenta uma boa resposta à medida que o ganho do filtro cresce em relação a amplitude do sinal. Para o primeiro caso, onde o sinal retangular esteve submetido a um filtro de ganho igual a 3, sendo a amplitude do sinal maior que três vezes a amplitude do filtro, a resposta com inteiros apresentou um índice de correlação razoável, porém para aplicações de alta precisão o mesmo já não serviria uma vez que seu índice de correlação foi igual a 0,98, ou seja, um erro de 2% em relação ao sinal filtrado utilizando *floating-point*. À medida que a constante do filtro aumenta em relação ao comprimento do sinal, ou seja, um filtro com frequência de corte mais baixa, a resposta do mesmo filtro piora. Para um ganho igual a 9, ainda inferior ao máximo da entrada, temos um coeficiente de correlação equivalente a 0,8038 para a entrada retangular e 0,6323 para a entrada senoidal, correspondendo a erros de 19,62% e 36,77% respectivamente. Erros de tal magnitude são inadmissíveis para a maioria das aplicações. Quando consideramos um ganho do filtro maior que a máxima amplitude do sinal, a saída se torna literalmente zero, como mostrado na seção 2.

Analisando os resultados obtidos pelo método “Ganho Quadrático”, podemos perceber que o mesmo apresenta uma ótima resposta para todos os ganhos analisados. Além disso, o mesmo estabiliza no mesmo ponto de estabilização do sinal filtrado em *floating-point*. O maior erro apresentado pelo mesmo método é para constante do filtro igual a 15, mesmo assim obtendo um erro menor que 0,6%.

O resultado obtido pelo método do “Soma Triangular” é levemente superior ao método do “Ganho Quadrático”. Sua resposta tanto para a entrada retangular quanto para a entrada senoidal teve um erro menor que a resposta do Ganho Quadrático, enquanto os erros para entrada senoidal foram os mesmos. Outro ponto interessante é que o erro médio desse método é 0,06% menor que o erro do método anterior.

Por fim, o método do resto acumulativo obteve um resultado intermediário quando

comparado com o Ganho Quadrático e “Soma Triangular”, e sua implementação é um pouco mais complexa que a dos demais. Todavia, seus resultados foram bem melhores que o cálculo tradicional com inteiros, podendo ser também uma substituição viável.

## 7 | CONCLUSÕES

Projetar filtros IIR somente com inteiros é um desafio ainda sem solução final, já que não existe uma técnica universal de projeto que contemple todos os requisitos para as diversas aplicações. O uso de aritmética inteira no projeto de filtros IIR incorre em riscos adicionais em relação ao seu uso em aritmética real. Um destes riscos, o do erro de truncamento (*round-off*) caso o sinal de entrada esteja no limiar de detecção, foi abordado neste trabalho e solucionado com proposta de dois novos métodos, o da “Soma Triangular” e o do “Resto Acumulativo”. Os métodos desenvolvidos mostraram-se eficazes, de fácil codificação e com baixo erro local ou global.

Comparando-se o cálculo tradicional com inteiros (sem o uso de nenhuma técnica de tratamento) e método do “Ganho Quadrático” (que não é nada mais que um simples contorno ao problema real) com os métodos propostos neste trabalho, é possível perceber que ambos apresentam resultados extremamente satisfatórios. O método da “Soma Triangular” apresenta o menor erro dentre todos, quando comparado com o filtro ideal (aritmética real) (0,55%). O método do “Resto Acumulativo” é mais intuitivo, pois mostra o erro sendo compensado em cada iteração, porém apresenta um desvio maior em relação ao filtro ideal (2,79%). O método do “Ganho Quadrático” é mais simples de ser implementado e é minimamente menos preciso que o da “Soma Triangular” (0,06%), mas apresenta o risco de *overflow* caso a entrada seja desconhecida. Além deste, ele apresenta uma desvantagem adicional já que ao se multiplicar a entrada pelo ganho ao quadrado, os números tornam-se grandes para os cálculos, resultando em um processamento mais lento e custoso.

Os métodos propostos neste estudo (“Soma Triangular” e “Resto Acumulativo”), por não sofrerem as influências numéricas do uso de inteiros, podem ser utilizados de forma a prover uma maneira precisa para calcular a passagem por zero (saída não normalizada) ou para calcular a amplitude real do sinal filtrado (saída normalizada).

Neste trabalho foram abordados apenas implementações de primeira ordem (filtros de primeira ordem) dos métodos propostos. Filtros de ordens superiores serão abordados em trabalho futuro. Esta escolha se deve a dimensão do tema abordado, não comprometendo o conceito e avaliação dos métodos propostos. Ademais, o cascadeamento de filtros de primeira ordem para que resultados similares aos de ordem superior sejam obtidos é muito comum em aplicações de *DSPs* que exigem grande velocidade de resposta, tornando os resultados aqui apresentados de imediata aplicação prática para o leitor. Exemplos práticos de utilização - inclusive a análise do caso que motivou este

desenvolvimento - serão abordados em trabalho futuro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a **Radice** e a **Treetech** pelo estímulo à pesquisa, que vem desde o fomento a ideias inovadoras, passando pelo ambiente empresarial que auxilia na superação dos desafios e chega ao final com o suporte integral a cadeia de PD&I, além do Prof. Rogério de Andrade Flauzino, do **Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação - SEL, da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP**, cuja participação foi essencial para a consistência dos resultados aqui apresentados.

## REFERÊNCIAS

Antoniou, A. (2016). *Digital signal processing*. McGraw-Hill.

Baranowski, J., Bauer, W., Zag'owska, M., and Piatek, P. (2016). On digital realizations of non-integer order filters. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 35(6), 2083–2107.

Bauer, W. and S lowik, W. (2017). Comparison fixed-point and floating-point implementation of noninteger filter of stm microcontroller. In *Conference on Non-integer Order Calculus and Its Applications*, 126–134. Springer.

Kodek, D. (1980). Design of optimal finite wordlength fir digital filters using integer programming techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(3), 304–308.

Kodek, D. and Steiglitz, K. (1981). Comparison of optimal and local search methods for designing finite wordlength fir digital filters. *IEEE Transactions on Circuits and systems*, 28(1), 28–32.

Oppenheim, A.V. (1999). *Discrete-time signal processing*. Pearson Education India.

Ott, G., Costa, E.A., Almeida, S.J., and Fonseca, M.B. (2019). Iir filter architectures with truncation error feedback for ecg signal processing. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 38(1), 329–355.

Prandoni, P. and Vetterli, M. (2008). *Signal processing for communications*. EPFL press.

Smith, S.W. et al. (1997). The scientist and engineer's guide to digital signal processing. *C.T.P.*

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

AMI 1, 2, 3, 4, 5, 7, 12, 124

Aneel 6, 52, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 84, 96, 127, 136, 209, 221

Aterramento 25, 27, 28, 29, 32, 34, 37, 38, 72, 77, 209

Automação 1, 7, 25, 26, 32, 33, 37, 61, 138, 149, 164, 168, 169, 325, 330, 333, 341

### C

Classificação 1, 12, 126, 128, 131, 134, 135, 136, 184, 209

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

Consumo de Energia 4, 83, 84, 138, 161, 172, 181, 259, 260

Curto-Circuito 65, 100, 126, 128, 131, 132, 133, 134, 135, 234

### D

Danos Elétricos 71, 72, 73, 76, 80, 82

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

Densidade de potência 13, 15, 16, 17, 19

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

Distribuição de Energia Elétrica 72, 81, 96, 112, 113, 125, 127, 210, 221, 222

DPS 71, 72, 77, 78, 79, 80, 81

### E

Ensaio 97, 98, 99, 103, 104, 108, 109, 111, 219, 324

Estudo comparativo 13, 15, 275

### I

IEC 61850 54, 55, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 207, 330, 331, 332, 333, 339, 340, 341, 342

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

### L

Linhas de transmissão 54, 56, 62, 64, 65, 112, 113, 227, 240, 327

### M

Medição 1, 3, 4, 7, 8, 11, 54, 58, 59, 60, 64, 79, 80, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 95, 96, 106, 138,

140, 141, 142, 217, 218, 219, 220, 221, 271, 272, 331, 338

Medidores Inteligentes 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

Motor de indução 13, 14, 19, 97, 98, 100, 101, 102, 104

Motor de indução trifásico 97, 98, 100, 101, 104

## **N**

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

## **P**

Previsão de Demanda 112, 113, 114, 115, 119, 124, 125

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

Proteção Diferencial 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69

## **Q**

Qualidade de energia 1, 11, 76, 96, 126, 127, 128, 217

## **R**

Redes Neurais Artificiais 112, 115, 126, 128, 136

Rendimento 15, 16, 19, 20, 95, 97, 98, 101, 102, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 301

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

## **S**

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

Smart Grid 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12, 192, 193, 195, 207, 341

Subestação 29, 83, 84, 95, 96, 112, 115, 116, 124, 331

## **T**

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

Transformador 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 132, 212, 213, 221, 313, 337

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

## **V**

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16