



Atena
Editora

Ano 2020

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
Marcelo Henrique Granza
(Organizadores)

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

2

A black and white photograph of a hand holding a square microchip. The chip is densely packed with small components and has a grid of pins around its perimeter. The background is a blurred workshop or laboratory setting with various electronic components and tools.

Atena
Editora

Ano 2020

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
Marcelo Henrique Granza
(Organizadores)

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

2

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Camila Alves de Cremo

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

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

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

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

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

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

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

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

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

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

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

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

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

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

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

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

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

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

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

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

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	<p>Engenharia elétrica e de computação [recurso eletrônico] : atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann, Marcelo Henrique Granza. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-168-8 DOI 10.22533/at.ed.688200707</p> <p>1. Ciência da computação – Pesquisa – Brasil. 2. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Granza, Marcelo Henrique.</p> <p style="text-align: right;">CDD 623.3</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

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

APRESENTAÇÃO

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

Produzir conhecimento em engenharia elétrica e da computação é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

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

Boa leitura!

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
Marcelo Henrique Granza

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
PARADOXOS, RISCOS E REQUISITOS DA NOVA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA	
Vitor Silva Duarte	
Mario Jorge Daher	
Alex Nunes de Almeida (<i>in memoriam</i>)	
Maria Aparecida Martinez	
DOI 10.22533/at.ed.6882007071	
CAPÍTULO 2	14
ANÁLISE DO IMPACTO DE GERAÇÕES RENOVÁVEIS SOBRE A MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO POR MEIO DE REGIÕES DE SEGURANÇA	
Paulo Andrade Novaes	
Antonio Carlos Zambroni de Souza	
Fábio da Costa Medeiros	
DOI 10.22533/at.ed.6882007072	
CAPÍTULO 3	28
APLICAÇÃO DE MODELO MULTIOBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OBRAS DE CONEXÃO DA REDE	
Paulo Sérgio Zanin Júnior	
Lina Paola Garcés Negrete	
Gelson Antônio Andrêa Brigatto	
DOI 10.22533/at.ed.6882007073	
CAPÍTULO 4	43
COMPLEXIDADES DA OPERAÇÃO DO SIN E SEUS IMPACTOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	
Vinicius Ragazi David	
Daniela Souza	
Leonardo Calabro	
João Carlos Mello	
Xisto Vieira Filho	
Edmundo P. Silva	
DOI 10.22533/at.ed.6882007074	
CAPÍTULO 5	61
ESTRATÉGIAS DE O&M UTILIZADAS NA GESTÃO DE DESEMPENHO DOS PARQUES EÓLICAS, EM TEMPO REAL, PÓS OPERAÇÃO E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO NO CURTO E MÉDIO PRAZO, MOSTRANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE BIGDATA, BUSINESS INTELLIGENCE E MACHINE LEARNING	
Flávio Martins ribeiro	
Marcus Antonius Queiroz da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.6882007075	
CAPÍTULO 6	72
IMPACT OF HOURLY PRICES ON FUTURE WIND FARM CONTRACTS IN BRAZIL	
João Carlos De Oliveira Mello	
Cláudio Ferreira	
Lucas Soares	
André Castro	
Daniela Souza	
Evelina Neves	
DOI 10.22533/at.ed.6882007076	

CAPÍTULO 7	83
DESAFIOS ENCONTRADOS NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NO COMPLEXO TERMELÉTRICO JORGE LACERDA	
Liliana Dutra dos Santos	
Rofferson Rosa Izidoro	
Daniel José Schmitz de Aguiar	
Fábio Silveira Costa	
Juceli Locks Junior	
DOI 10.22533/at.ed.6882007077	
CAPÍTULO 8	96
AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS DINÂMICOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO PARA ESTRUTURAS DE SUBESTAÇÕES	
Rafael Faria da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.6882007078	
CAPÍTULO 9	108
ESTUDO E SIMULAÇÃO DE PROTEÇÃO DE ZONA MORTA EM SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Rodrigo Niederauer da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.6882007079	
CAPÍTULO 10	121
ELETROENCEFALÓGRAFO DE BAIXO CUSTO: CONCEITOS E PROJETO	
Vitor Nestro Rauffmann	
Pedro Bertemes Filho	
DOI 10.22533/at.ed.68820070710	
CAPÍTULO 11	135
FONTES DE CORRENTE EM TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA MULTIFREQUENCIAL: ESTADO DA ARTE	
Lucas Cordeiro Butzke	
Pedro Bertemes Filho	
DOI 10.22533/at.ed.68820070711	
CAPÍTULO 12	148
TEORIA E ESTUDOS DE APLICAÇÕES DA TRANSFORMADA FRACIONAL DE FOURIER	
Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento	
Adailton Braga Júnior	
Beatriz Cristina Reis Cordeiro	
Marcelo Luiz de Carvalho Ribeiro	
Pierre Teixeira Rodrigues	
Petrus Luiz Luna Pequeno	
Antônio Carlos Duarte Ricciotti	
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti	
DOI 10.22533/at.ed.68820070712	

CAPÍTULO 13	166
RELÉ INTELIGENTE BASEADO NA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE 4 VALORES MULTIFUNCIONAL - RI LPA4V	
Viviane Barrozo da Silva Ghendy Cardoso Júnior Antonio Carlos Duarte Ricciotti Pierre Teixeira Rodrigues Marcelo Luiz De Carvalho Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.68820070713	
CAPÍTULO 14	179
OPEN SOURCE MODULAR DIDACTIC PLATFORM FOR POWER ELECTRONICS TEACHING	
Lucas Koleff Gustavo Soares Valentim Luciana da Costa Marques Victor Praxedes Rael Adrian D'Lucas Cardoso Gonçalves Wilson Komatsu Lourenço Matakas Junior	
DOI 10.22533/at.ed.68820070714	
CAPÍTULO 15	204
AUTOMAÇÃO DA CABINE DE LIMPEZA DE IMPRESSÃO 3D BINDER JETTING	
João Batista Machado Silva Leonardo Bevilaqua dos Santos Lucas Leandro Gomes Mariana Silva do Nascimento Gonçalves Vinícius de Moares Barboza Rogério Luis Spagnolo da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.68820070715	
CAPÍTULO 16	218
USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA OBTENÇÃO DE UM SENSOR AR/COMBUSTÍVEL VIRTUAL APLICADO A UM MOTOR MONOCILÍNDRICO	
Leonardo Faure Nardini Paschoa Sergio Ribeiro Augusto	
DOI 10.22533/at.ed.68820070716	
CAPÍTULO 17	229
INVESTIGAÇÃO DOS MÉTODOS NORMATIVOS PARA O CÁLCULO E ESTIMAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	
Daniel Carrijo Polonio Araujo Gabriel De Souza Pereira Gomes Mateus Batista De Moraes Rafael Prux Fehlberg	
DOI 10.22533/at.ed.68820070717	
CAPÍTULO 18	242
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM A UTILIZAÇÃO DE MANTA TÉRMICA: ESTUDO DE CASO DE UMA INJETORA DE PEÇAS PLÁSTICAS	
Ivo Carlos Guarato Júnior Lúcio Rogério Júnior Antônio Manoel Batista da Silva Guilherme Henrique Alves	
DOI 10.22533/at.ed.68820070718	

CAPÍTULO 19	254
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA PARA PESQUISA DE PRODUTOS DE SUPERMERCADO	
Marcelo Garcia Palma	
DOI 10.22533/at.ed.68820070719	
SOBRE OS ORGANIZADORES.....	271
ÍNDICE REMISSIVO	272

APLICAÇÃO DE MODELO MULTIOBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OBRAS DE CONEXÃO DA REDE

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 03/04/2020

Paulo Sérgio Zanin Júnior

Enel Distribuição Goiás e Universidade Federal de Goiás
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/3004032224048534>

Lina Paola Garcés Negrete

Universidade Federal de Goiás
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/3707701912481754>

Gelson Antônio Andrêa Brigatto

Universidade Federal de Goiás
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/1356780309218421>

RESUMO: A geração distribuída cresce de maneira relevante no Brasil, modificando o setor elétrico em suas diversas esferas. Este trabalho aplica um modelo de otimização multiobjetivo referente a empreendimentos de geração distribuída, considerando aspectos técnicos e econômicos. Tal modelo permite encontrar um conjunto de configurações para alocação de empreendimentos de geração distribuída, utilizando um algoritmo genético e a métrica Maximin para formação de um conjunto-Pareto

de soluções, e, por meio de critérios de tomada de decisão, escolher uma dessas configurações como solução do problema.

PALAVRAS-CHAVE: Geração Distribuída, Algoritmos Genéticos, Métrica Maximin, Otimização Multiobjetivo.

MULTIOBJECTIVE MODEL APPLICATION FOR DISTRIBUTED GENERATOR SITING IN DISTRIBUTION SYSTEMS CONSIDERING NETWORK CONNECTION WORKS

ABSTRACT: Distributed generation grows relevantly in Brazil, modifying electrical sector in several ways. This work applies a multi-objective optimization model to distributed generation assets, considering technical and economic aspects. This model finds a set of siting configurations to distributed generation assets, using a genetic algorithm and Maximin metric to form a Pareto solution set and by some decision-making criteria, it allows the choice of one of the solutions.

KEYWORDS: Distributed Generation, Genetic Algorithms, Maximin Metric, Multi-objective Optimization.

1 | INTRODUÇÃO

A GD é uma fonte de energia elétrica conectada à rede de distribuição em uma unidade consumidora (UC) que é suficientemente menor que as grandes plantas de geração (GONZALEZ-LONGATT e FORTOUL, 2005). No Brasil, esta modalidade de geração é atualmente definida via resoluções normativas (REN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 482/2012, 687/2015 e 786/2017, sendo classificada em microgeração distribuída (microGD) – de 0 a 75 kW – e minigeração distribuída (miniGD) – de 75 kW a 5 MW – com três categorias de compensação para além da própria UC geradora: empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto (ANEEL, 2012), (ANEEL, 2015), (ANEEL, 2017(a)). Além disso o trâmite de acesso ficou regulamentado por meio do módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL (ANEEL, 2017(b)).

A GD apresenta-se no mercado brasileiro como uma alternativa à geração centralizada e distante dos centros de carga, sendo, portanto, uma resposta a vários fatores que pressionam a busca por formas diferentes de aumentar a oferta de energia e por tecnologias de conversão de pequeno porte, baixo impacto ambiental, mais eficientes e que reduzam custos (ZILLES, MACÊDO, *et al.*, 2012). Além disso, a GD no Brasil, que já ultrapassou a marca histórica de 1 GW de potência instalada (ANEEL, 2019), vence, gradativamente, os conhecidos desafios em países em desenvolvimento: incertezas regulatórias; falta de acesso a financiamentos; falta de informação, padronização de equipamentos e mão-de-obra capacitada; e barreiras fiscais de importação (REN 21, 2017).

Entretanto, a inserção deste tipo de fonte – em geral intermitente – agrega grande complexidade na integração devido a: múltiplos cenários operacionais, sazonalidade de fontes primárias, necessidade de reajustes de proteção devido a fluxos bidirecionais, aumento dos níveis de curto-circuito na vizinhança do ponto de conexão da GD, etc., especialmente em uma rede planejada para operar radialmente, como as redes de distribuição no Brasil,

Este trabalho, portanto, se insere neste contexto, no qual a GD é vista como uma resposta a fatores energéticos, mercadológicos e socioambientais. Propõe-se uma metodologia de alocação de empreendimentos de GD, por meio de um modelo de otimização multiobjetivo envolvendo um aspecto técnico de interesse da Companhia de Distribuição (CoDis) – redução de perdas ativas de energia – e um aspecto econômico de interesse do empreendedor da GD – o custo de implantação do seu empreendimento, considerando os custos de conexão.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados os principais conceitos necessários para compreensão do trabalho; no capítulo 3 é apresentado o modelo matemático e de otimização; no capítulo 4 são apresentados os resultados de aplicação do modelo em dois casos; e no capítulo 5, faz-se a conclusão do

trabalho.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica cobrirá os seguintes conceitos: 2.1. Fluxo de potência, uma das análises técnicas de maior importância para o cálculo de impacto da GD na rede; 2.2. Custo de implantação, um importante componente da análise econômica da GD; 2.3. Otimização multiobjetivo e dominância, conceitos utilizados quando dois objetivos são analisados concomitantemente; 2.4 Métrica Maximin, método selecionado para elaboração da fronteira de Pareto; e 2.5. Algoritmos genéticos (AG), a meta-heurística selecionada para realizar o processo de otimização.

2.1 Fluxo de potência

O problema fluxo de potência em sistemas elétricos de potência consiste em encontrar todas as variáveis (módulos e fases das tensões/correntes e potências ativa, reativa e aparente) do sistema elétrico em qualquer um dos equipamentos desta rede em regime permanente para avaliar a condição operativa do sistema em um determinado momento (MONTICELLI, 1983). O fluxo de potência é ferramenta fundamental para diversos estudos e análises de planejamento, proteção e operação do sistema (ZANIN JÚNIOR, 2019).

Há diversos métodos matemáticos para solucionar o problema do fluxo de potência. Foi selecionado para este trabalho o método de soma de potências (MSP), dado que ele é eficiente para redes radiais de distribuição de energia (BROADWATER, CHANDRASEKARAM, *et al.*, 1988). O método foi aplicado conforme descrito em Brigatto (2011) e Zanin Júnior (2019), por meio da solução iterativa de dois subsistemas via processos de varredura inversa, que acumula potência ativa e reativa nas barras, e direta, que corrige as tensões nas barras (varredura *backward-forward*). O MSP, portanto, permite, com o uso de álgebra e solução de equação de 4º grau reduzível à equação de 2º grau, encontrar a solução do problema do fluxo de potência, convergindo, em geral, com poucas iterações.

2.2.2. Custo de implantação

O custo de implantação (C_I) de um conjunto de empreendimentos de GD pode ser definido como a soma de duas componentes. A primeira componente é referente ao custo de instalação (C_{INS}) de cada um dos empreendimentos. Neste trabalho, utilizam-se os valores médios por tecnologia de 2018 publicados por IRENA (2019), que estão apresentados na TABELA 1, juntamente com custos fixos de operação e manutenção anuais ($C_{o\&m}$) e fator de capacidade para as tecnologias de GD utilizadas nos estudos de caso deste trabalho, ambos baseados nos dados publicados por IRENA (2019).

A segunda componente do custo de implantação é o custo de conexão (C_{CON}),

referente às possíveis obras de adequação, melhoria e reforço da rede necessárias para integração dos empreendimentos de GD sem comprometimento da operação da rede. Em geral, nas empresas de distribuição do Brasil, essas obras são definidas por um engenheiro eletricista no âmbito do planejamento da distribuição após diversas análises e, devido ao grande número de pedidos de conexão de geração distribuída, dá-se preferência à análise comparativa entre os 4 cenários mais críticos de fluxo de potência: carga leve – geração máxima, carga leve – geração mínima, carga pesada – geração máxima e carga pesada – geração mínima.

Tecnologia	C_{INS} (USD/kWp)	$C_{o\&m}$ (USD/kWp)	Fator de Capacidade (%)
Fotovoltaica	1210	14,5	18
Eólica (<i>onshore</i>)	1497	62,5	34
Hidráulica	1492	44,76	47
Bioenergia	3976	159,04	84

TABELA 1 – C_{INS} , $C_{o\&m}$ e fator de capacidade médios por tecnologia de geração (IRENA, 2019).

A partir dos resultados das simulações de fluxo de potência, verifica-se se há alguma perturbação prejudicial ao sistema de potência. As perturbações mais analisadas são: variação rápida de tensão acima de determinado valor limite (em geral as distribuidoras brasileiras adotam 5%) entre cenários de geração máxima e mínima, sem alteração do cenário de carga (especialmente devido à intermitência das fontes renováveis); violação do limite superior de tensão de 1,05 p.u. (ANEEL, 2017(c)) no cenário de carga leve – geração máxima; ultrapassagem da ampacidade dos cabos em todos os cenários.

Esta componente de custo possui uma forte influência técnica e, de certa forma, norteia o empreendedor de GD a buscar pontos com mais carga/redes mais robustas de forma a minimizar ou mesmo nulificar esta componente. Portanto, quanto maiores forem as perturbações no sistema elétrico ocasionadas pelas GD, maior será o custo das obras de conexão, que podem ser desde um regulador de tensão/recondutoramento de trecho do alimentador à construção de novo alimentador exclusivo/implantação de novos transformadores em subestações, etc.

2.3 Otimização multiobjetivo e dominância

A otimização multiobjetivo é definida como um problema de minimização de um conjunto de funções-objetivo que são conflitantes entre si. Em termos matemáticos, esse problema pode ser escrito de acordo com a equação (1).

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } F(x), F = [f_1, f_2, \dots, f_{n_f}], x = [x_1, x_2, \dots, x_{n_x}] \\ & \text{sujeito a } \left\{ \begin{array}{l} g_i(x_j) = 0, i = 1, \dots, n_g \\ h_i(x_j) \leq 0, i = 1, \dots, n_h \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ j \in 1, 2, \dots, n_x \end{array} \right. \end{aligned} \quad (1)$$

Em que f_1, f_2, \dots, f_{n_f} são as n_f funções-objetivo; x_1, x_2, \dots, x_{n_x} são as n_x variáveis das n_f funções-objetivo; g_1, g_2, \dots, g_{n_g} são as n_g funções que representam restrições de igualdade; h_1, h_2, \dots, h_{n_h} são as n_h funções que representam restrições de desigualdade; e x_{\min} e x_{\max} são os limites das restrições de fronteira para o vetor de variáveis (ZANIN JÚNIOR, 2019).

Na resolução de problemas de otimização multiobjetivo, encontram-se soluções que satisfazem as restrições, porém, não é possível definir um ponto ótimo, já que a melhora em uma avaliação de uma função-objetivo causa uma piora em uma avaliação de outra função-objetivo, dado que elas são conflitantes. Para isso, define-se o conceito de dominância de Pareto: um conjunto de pontos ótimos no qual uma solução não pode melhorar uma de suas avaliações de uma função-objetivo sem degradar as avaliações de outras funções objetivo. O conjunto dessas soluções, ditas não-dominadas ou soluções de Pareto, é denominado conjunto de Pareto ou fronteira de Pareto.

2.4 Métrica Maximin, Espalhamento da fronteira de Pareto

A métrica Maximin é uma técnica capaz de classificar, numericamente, uma solução em dominada ou não-dominada e por trazer informação numérica do grau de aglomeração da solução não-dominada, podendo ser escrita de acordo com a equação (2).

$$\text{Maximin}_i = \max \left\{ \min_{\substack{j=1, \dots, Npop \\ j \neq i}} \{ f_1^i - f_1^j, \dots, f_{n_f}^i - f_{n_f}^j \} \right\}, i \in [1, NPop] \quad (2)$$

Em que $Npop$ é o número de indivíduos da população e i é o índice que representa o indivíduo da população. Os indivíduos que possuem valor negativo na métrica Maximin são soluções não-dominadas (fronteira de Pareto) e quanto mais negativo for o seu Maximin, menos aglomerada a solução está em relação às outras soluções de Pareto. Um detalhamento matemático maior sobre esta técnica, exemplificações, bem como suas vantagens podem ser encontrados em Li (2004), Brigatto (2011), Menchaca-Mendez & Coello (2013), Zanin Júnior (2019).

Uma medida importante da fronteira de Pareto é o seu espalhamento, ou seja, o quanto bem distribuídas estão as soluções na fronteira. A distribuição das soluções na fronteira é melhor quanto mais o espalhamento se aproxima de zero, o que é um indício de que o processo de otimização trabalhou em todo o espaço de busca. O espalhamento da fronteira de Pareto, S , é calculado conforme equação (3), na qual N é o número de

soluções na fronteira de Pareto.

$$S = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{i=1}^l (\bar{d} - d_i)^2}, d_i = \min_{\substack{j=1, \dots, l \\ j \neq i}} \left\{ |f_1^i - f_1^j| + |f_2^i - f_2^j| + \dots + |f_{n_j}^i - f_{n_j}^j| \right\}, i \in [1, l] \quad (3)$$

2.5 Algoritmos genéticos

Os AG são parte da computação evolucionária, cujo princípio básico é o de utilizar um conjunto de soluções iniciais para resolução do problema, e não apenas uma, como é o caso dos algoritmos clássicos de cálculo numérico (ENGELBRECHT, 2007). Eles são inspirados na teoria da evolução de Charles Robert Darwin (1809 – 1882) e surgem com o trabalho de John Henry Holland (1929 – 2015) na década de 80, sendo aplicados a diversas áreas do conhecimento na atualidade para resolução de problemas complexos e não facilmente solucionáveis com algoritmos clássicos. A TABELA 2 apresenta a correspondência entre termos da linguagem biológica e da linguagem computacional dos AG. Vale destacar que para descrever o funcionamento de um AG, em geral se utilizam ambas as linguagens de maneira intercambiável.

Linguagem biológica	Linguagem computacional
Cromossomo	Indivíduo, <i>string</i>
Gene, material genético, genótipo	Característica
Alelo	Valor
Locus	Posição
Fenótipo	Avaliação
Geração	Iteração
Pai	Indivíduo selecionado para gerar indivíduos para a iteração sucessora
Filho, Prole	Indivíduo(s) gerado(s) a cada iteração
População	Conjunto de indivíduos

TABELA 2 - Correspondência entre linguagem biológica e linguagem computacional (ZANIN JÚNIOR, 2019)

3 | MODELO MATEMÁTICO E DE OTIMIZAÇÃO

O modelo matemático é descrito com base nas informações apresentadas nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 e é composto por duas funções objetivos e restrições para o problema de alocação de empreendimentos de GD. A primeira função-objetivo são as perdas ativas de energia de um dia na rede de distribuição, as quais representam o critério técnico de interesse da distribuidora. A segunda função-objetivo é o custo de implantação do empreendedor de GD, que é composto do custo de instalação e do custo de conexão e

representa o critério econômico. As restrições estabelecidas são: violação da ampacidade dos cabos, violação de limite superior de tensão e variação rápida de tensão maiores que seus respectivos limites. A equação (4) expressa este modelo.

$$\text{Minimizar: } \left\{ \begin{array}{l} E_{Perdas} = \sum_t \left[\sum_{km} r_{km} \times I_{km}^2(t) \right] \\ C_I = C_{Ins} + C_{Con} \end{array} \right\}, \text{ Sujeito a } \left\{ \begin{array}{l} I_{km}(t) \leq A_{km} \\ V_k(t) \leq V_{m\acute{a}x} \\ \Delta V_k(t) \leq \Delta V_{m\acute{a}x} \\ k, m \in \Omega_B, t \in \Omega_T \text{ e } km \in \Omega_L \end{array} \right\} \quad (4)$$

Em que E_{Perdas} é a energia de perdas ativas em um dia (perdas técnicas diárias) em Wh, Ω_T é o conjunto de intervalos de tempo de cada uma das simulações de fluxo de potência – que neste trabalho é um vetor horário de um dia [00:00 – 1:00, 1:00 – 2:00, ... 23:00 – 24:00], t é o indicador de horário, Ω_L é o conjunto de ramos da rede elétrica de distribuição, r_{km} é a resistência em ohms do ramo km , $I_{km}(t)$ é a corrente no ramo km em amperes no horário t , A_{km} é a ampacidade do ramo km em amperes, $V_k(t)$ é a tensão em p.u. na barra k no horário t , $V_{m\acute{a}x}$ é o limite superior de tensão em p.u. – que é de 1.05 p.u. (ANEEL, 2017(c)), $\Delta V_k(t)$ é a variação rápida de tensão em p.u. na barra k no horário t , $\Delta V_{m\acute{a}x}$ é o limite de variação rápida de tensão permitida – que neste trabalho é de 0,05 p.u. e Ω_B é o conjunto de barras da rede elétrica de distribuição.

As simulações de fluxo de potência, conforme equação (4), são efetuadas 24 vezes para cada uma das possíveis soluções (simulações horárias) para se obter o valor de E_{Perdas} , considerando a curva de carga horária da rede de distribuição e também curvas típicas de geração, para cada uma das fontes, de acordo com o fator de capacidade da TABELA 1. Essas simulações também fornecem, conforme seção 2.1, os valores de tensão e corrente, a cada hora, que permitem a verificação das três restrições.

Existem diversas formas de tratar a violação das restrições: rejeição, penalização, conversão do problema com restrições em sem restrições, manutenção do espaço de busca na região de factibilidade, etc (ZANIN JÚNIOR, 2019). Como o custo de conexão é maior quanto maiores forem as violações para situações práticas de análise de conexão de GD, estas violações serão incorporadas neste custo e dessa forma a violação de restrições será inserida na forma de penalização – violar as restrições piora a avaliação do indivíduo em uma função-objetivo, a econômica. A título de exemplo, a FIGURA 1 apresenta uma dispersão de custo de conexão por potência da GD da Enel Distribuição Goiás, que mostra a não-linearidade e a dificuldade de previsão do valor desta função.

Conforme consta na seção 2.2., existem muitas variáveis que influenciam o custo das obras de conexão: nível de curto-circuito do ponto de conexão, perfil de carga do alimentador, configuração da subestação, esquema de proteção, perfil de geração da fonte GD, etc. Esta função, custo de conexão, pode ser personalizada por cada CoDis, utilizando AG, redes neurais artificiais ou *machine learning* para o cálculo o seu cálculo.

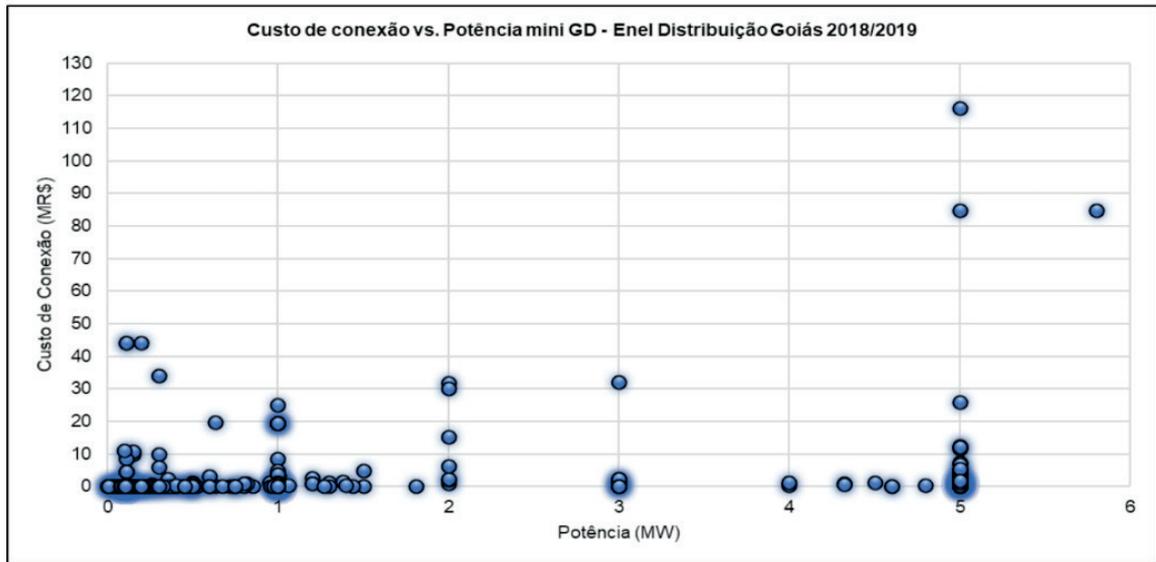


FIGURA 1 – Dispersão de custo de conexão para pedidos de acessantes GD da Enel Distribuição Goiás de janeiro/2018 a junho/2019 em função da potência da GD.

Para este trabalho, foi elaborada uma função de custo de conexão que aumenta exponencialmente de acordo com o número de violações de corrente em relação ao tamanho do sistema e de acordo com o número de violações de tensão e/ou variação rápida de tensão em relação ao tamanho do sistema – estes foram agrupados devido a geralmente estarem associados a uma mesma obra para solução de problemas de tensão. Assim sendo, esta função está descrita pela equação (5), na qual N_B é o número de barras do sistema. Quando não há violação de tensão e/ou corrente, o seu respectivo termo se torna nulo.

$$C_{Con} = C_{Ins} \left[e^{\frac{\max(\sum I_{km}(t)-1)}{N_B}} - 1 \right] + C_{Ins} \times \left[e^{\max\left(\frac{\max(\sum V_k(t)-V_{m\acute{a}x})}{N_B}, \frac{\max(\sum \Delta V_k(t)-\Delta V_{m\acute{a}x})}{N_B}\right)} - 1 \right] \left\{ \begin{array}{l} \forall V_k(t) > V_{m\acute{a}x} \\ \forall I_{km}(t) > A_{km} \\ \forall t \in \Omega_T \\ \text{com } k, m \in \Omega_B \text{ e } km \in \Omega_L \end{array} \right\} \quad (5)$$

Se não houver violação, =0 *Se não houver violação, =0*

O custo de instalação é calculado pela equação (6), na qual N é o número de empreendimentos de GD que estão sendo alocados, n é o identificador do empreendimento de GD, C_{instal}^n é o custo de instalação em USD/kWp do empreendimento de acordo com sua tecnologia de geração (ver TABELA 1), NGD_n é o número de módulos de GD e PGD_n é a potência de cada um dos módulos de GD *e.g.* $n=1$ indicia que se trata do empreendimento 1, $NGD_1=5$ e $PGD_1=300$ kWp indicam que são 5 módulos de 300 kW, ou seja, uma GD de 1500 kWp.

$$C_{Ins} = \sum_{n=1}^N C_{instal}^n \times NGD_n \times PGD_n \quad (6)$$

O modelo de otimização baseia-se nas seções 2.3, 2.4 e 2.5 e utiliza os resultados do modelo matemático e para buscar as soluções do problema. O AG deste problema possui

um cromossomo com genes, sendo que cada gene possui número de barra e número de módulos de GD. Cada um dos genes está associado a uma fonte de geração, com sua associada potência modular, número máximo de módulos e conjunto de possíveis barras candidatas. As representações do cromossomo e dos atributos de cada gene estão apresentadas nas TABELA 3 e TABELA 4.

n	1	2	3	4
Genótipo				
Barra Candidata	56	97	137	43
NGD_n	5	8	10	3

TABELA 3 – Exemplo de cromossomo do algoritmo genético

n	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	PGD_n (kWp)
1	Fotovoltaica - A	[22 56 120 190]	10	200
2	Eólica	[37 54 97 210 256]	2	1000
3	Hidráulica	[130 137]	3	500
4	Fotovoltaica - B	[12 43 89 136 200 233]	15	150

TABELA 4 – Exemplo de características associadas a cada gene do cromossomo apresentado na TABELA 3

A população inicial é composta por indivíduos cujas barras e número de módulos de GD de seus cromossomos são escolhidos de maneira aleatória. A cada iteração, as funções-objetivo e as restrições são aplicadas à população. Caso alguma restrição seja violada, há uma penalização no custo de conexão, que compõe a função-objetivo de custo de implantação. Então, os resultados da avaliação são normalizados, submetidos à métrica Maximin e classificados. Os indivíduos cujo valor da métrica Maximin é menor que zero compõem a fronteira de Pareto.

Em seguida são aplicados os operadores genéticos à população: elitismo, no qual são reservados para a próxima população os 20% melhores indivíduos; seleção, pelo método da roleta viciada, tendo como critério o valor da métrica Maximin, que quanto mais negativa for, maior a probabilidade de seleção; recombinação com taxa de 100% com corte simples no cromossomo em local aleatório; e mutação com taxa de 5% em um dos genes de maneira aleatória, respeitando suas características inerentes, conforme TABELA 4.

Após este processo, tem-se uma nova população e o processo se repete até que o critério de parada adotado – neste trabalho é o número de iterações – seja atingido. No fim do processo, obtêm-se uma fronteira de Pareto ótima com os melhores indivíduos para as funções-objetivo a serem minimizadas e pode-se adotar algum critério de decisão para selecionar um dos pontos.

No próximo capítulo, são apresentados dois estudos de caso, destacando-se 4 critérios de decisão: E_{Perdas} mínima, previsão de energia gerada anual máxima, aproximação Máx-Mín (AMM, ponto de equilíbrio entre os objetivos) e mínimo custo global (MCG) de acordo com a metodologia prevista no módulo 2 do PRODIST para monetização de perdas diferenciais de energia por meio do custo marginal da expansão (CME). Adotou-se R\$ 193/MWh como CME (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016), 8% de taxa de interesse, 3,88 R\$/USD de taxa de câmbio e um horizonte de 10 anos para monetização das perdas diferenciais, as quais são calculadas subtraindo o valor da perda técnica diária encontrada para a solução de E_{Perdas} mínima do valor de perda técnica diária de todas as soluções, de forma a compará-las. Para o cálculo do custo global (CG), o valor das perdas diferenciais monetizadas e C_{con} foram somados, desconsiderando C_{ins} .

4 | RESULTADOS

Conforme mencionado na seção anterior, serão apresentados dois estudos de caso neste capítulo: A, no qual o estudo é feito com uma rede adaptada de um alimentador urbano da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) Distribuição e B, o qual é feito com um alimentador da Enel Distribuição Goiás.

4.1 Estudo de caso A

O alimentador (al.) deste caso está representado na FIGURA 2(a), possui 192 barras e 191 ramos em 13,8 kV e possui carga máxima de 8,73 MVA (para dados do al., ver BRIGATTO (2011)), que pode ser visualizada na FIGURA 2(b) na forma de corrente e os dados para aplicação do modelo multiobjetivo estão contidos na TABELA 5.

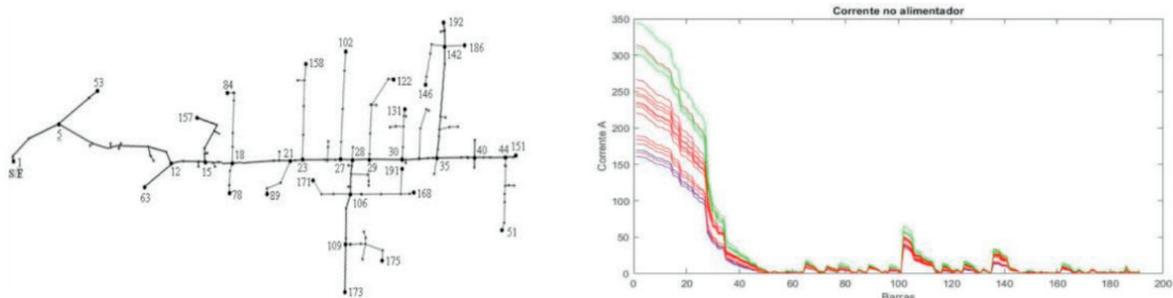


FIGURA 2 – (a) Desenho do al. (BRIGATTO, 2011) (esquerda) e (b) Corrente horária al. do caso A. (direita)

n	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	PGD_n (kWp)
1	Fotovoltaica	[12 35 68 99 143]	15	200
2	Eólica	[23 78 111 154]	10	300
3	Hidráulica	[56 144]	5	500
4	Biomassa	[42 69 132]	6	500

A fronteira de Pareto resultante do processo de otimização, que utilizou uma população de 100 indivíduos e 500 gerações, está representada na FIGURA 3(a). A FIGURA 3(b) apresenta a previsão de energia gerada anualmente e o valor do custo global (CG) para cada uma das soluções. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I, II e III.

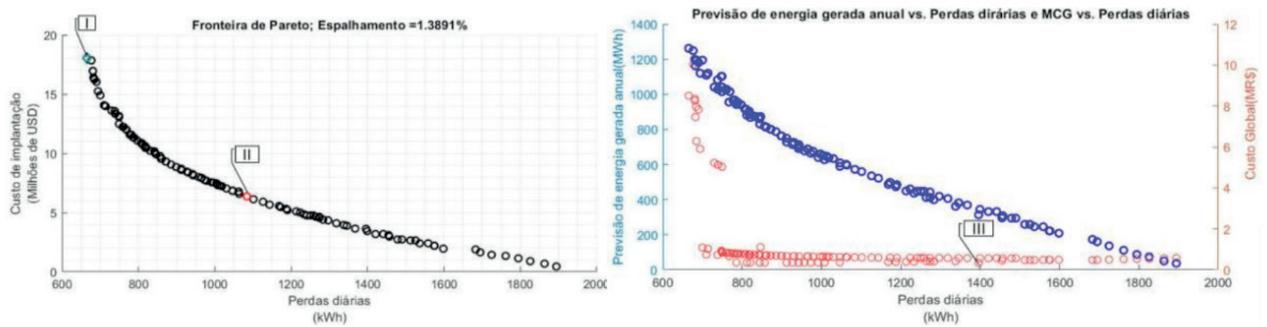


FIGURA 3 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) – Caso A.

O indivíduo I com avaliação de 18,06 MR\$ – 665,4 kWh/dia, é o indivíduo de E_{Perdas} mínima e o de maior previsão de energia gerada – 1262,2 MWh/ano – e possui o genótipo: Barra 99 – 1,6 MW (fotovoltaica), Barra 111 – 3,0 MW (eólica), Barra 144 – 1,0 MW (hidráulica) e Barra 132 – 2,0 MW (biomassa). O indivíduo II é o da AMM, representando o ponto de equilíbrio entre os objetivos, com avaliação 3,63 MR\$ – 1396 kWh/dia e genótipo: Barra 111 – 0,6 MW (eólica), Barra 468 – 0,5 MW (hidráulica) e Barra 632 – 0,5 MW (biomassa). Este indivíduo II evidencia que se pode ter uma redução considerável nas perdas ativas de energia (redução de 26,5% em relação a E_{Perdas} sem GD de 1900 kWh/dia) com um custo mais modesto (aprox. 5 vezes menor), se comparado ao da solução I.

O indivíduo III é o de MCG, possui avaliação 3,43 MR\$ – 1400 kWh/dia e genótipo: Barra 12 – 0,2 MW (fotovoltaica), Barra 111 – 0,6 MW (eólica), Barra 144 – 1,5 MW (hidráulica). Observa-se que este indivíduo é um vizinho de II, portanto, o MCG neste caso está em torno do ponto de equilíbrio da fronteira. Além disso, nota-se na FIGURA 3(b) que os indivíduos com custo de instalação mais elevados possuem obras de conexão mais caras, fazendo que seus CG alcancem valores entre 4 -10 MR\$ (pontos vermelhos na região superior-esquerda da FIGURA 3(b)).

4.2 Caso B

O alimentador deste caso é o circuito 01 da subestação (SE) Goiânia Leste, SE compartilhada entre a Enel Distribuição Goiás e a CELG GT, com 4 x 50 MVA – 230/13,8

kV e 27 alimentadores, que alimentam em torno de 15 a 20% da carga total do município de Goiânia (GO). Este alimentador pode ser visualizado na FIGURA 4(a) e possui uma carga máxima de 8,2 MVA, a qual pode ser visualizada sob forma de corrente na FIGURA 4(b). Os dados para aplicação do modelo multiobjetivo estão contidos na TABELA 6.

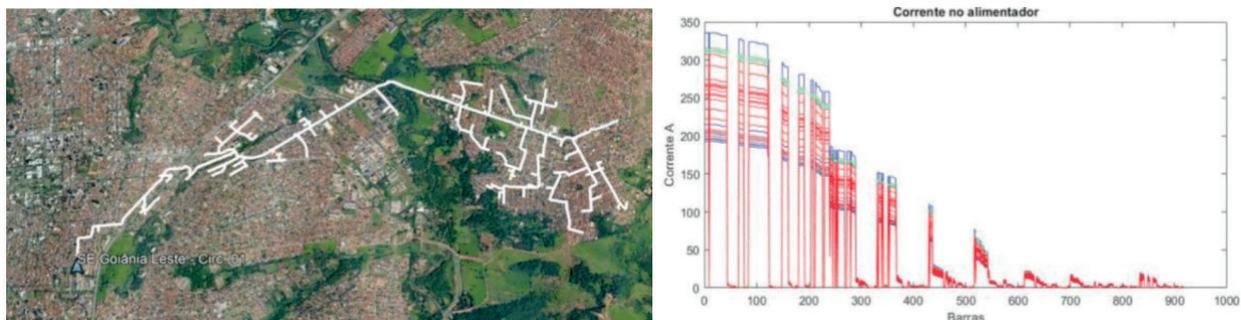


FIGURA 4 – (a) Georepresentação do al. Goiânia Leste 1 (esquerda) e (b) Corrente horária no al. do caso B (direita).

n	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	PGD_n (kWp)
1	Fotovoltaica - 1	[129 248 367 565]	10	500
2	Fotovoltaica - 2	[138 468 737 811]	10	500
3	Fotovoltaica - 3	[53 352 632 906]	10	400

TABELA 6 – Dados de entrada de possíveis GD no alimentador do caso B.

Este caso foi elaborado exclusivamente com fontes fotovoltaicas por se tratar de um alimentador em uma região bastante urbanizada. A fronteira de Pareto resultante do processo de otimização, que utilizou uma população de 100 indivíduos e 500 gerações, está representada na FIGURA 5(a). A FIGURA 5(b) apresenta a previsão de energia gerada anualmente e o valor do custo global para cada uma das soluções. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I, II e III.

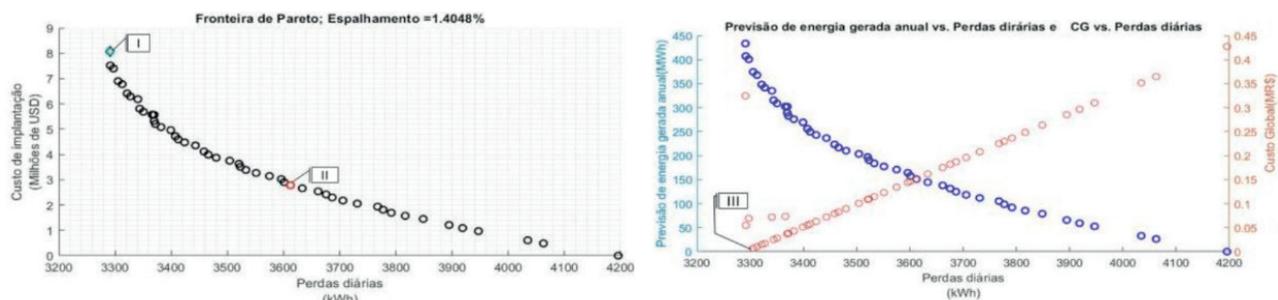


FIGURA 5 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) - Caso B.

O indivíduo I com avaliação de 8,07 MR\$ – 3291 kWh/dia, é o indivíduo de E_{Perdas} mínimo e o de maior previsão de energia gerada – 433,62 MWh/ano – e possui o genótipo: Barra 248 – 3,5 MW, Barra 468 – 1,5 MW e Barra 632 – 1,6 MW. O indivíduo II é o da AMM, representando o ponto de equilíbrio entre os objetivos, com avaliação 2,78 MR\$ – 3612 kWh/dia e genótipo: Barra 565 – 0,5 MW, Barra 468 – 1,0 MW e Barra 632 – 0,8 MW. Novamente, pode-se notar que é possível reduzir as perdas ativas de energia em 14 % (E_{Perdas} sem GD de 4200 kWh/dia) com uma solução com custo de investimento relativamente reduzido, em relação à solução I.

O indivíduo III, de MCG, possui avaliação de 7,4 MR\$ – 3297 kWh/dia, ou seja, quase a mesma de I, e possui genótipo: Barra 248 – 3,5 MW, Barra 468 – 1,0 MW e Barra 632 – 1,6 MW. Isso ocorre porque o indivíduo I possui custo associado às obras de conexão, o que pode ser observado pelo seu desvio dos outros pontos em relação à curva de custo global (ponto vermelho na região superior-esquerda da FIGURA 5(b)).

Foi simulado um subcaso adicional em que $n = 3$ é uma GD cuja fonte é biomassa e não fotovoltaica, denominado Caso B.ad. Os resultados encontrados estão representados na FIGURA 6(a), que exibe a fronteira de Pareto para este caso e na FIGURA 6(b), que exibe a previsão de energia gerada anual e o CG em função das perdas. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I e II.

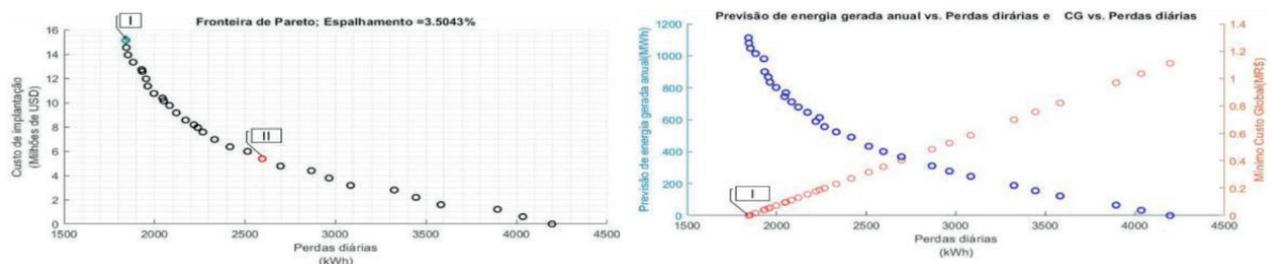


FIGURA 6 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) – Caso B.ad.

Nota-se que com a possibilidade da entrada da fonte de biomassa, as perdas diárias entraram em novo patamar de redução: E_{Perdas} mínimo de 3291 kWh/dia (redução de 21,6%) no caso B para mínimo E_{Perdas} de 1843 kWh/dia (redução de 56,1%). Isso ocorre devido à menor intermitência da fonte de biomassa e à sua conseqüente prevalência em relação às GD solares fotovoltaicas. O indivíduo I, neste caso é o de E_{Perdas} mínimo, MCG e de maior previsão de energia gerada anual – 1112,52 MWh/ano – e possui avaliação 15,14 MR\$ – 1843 kWh/dia e genótipo: Barra 248 – 1,5 MW (fotovoltaica), Barra 468 – 0,5 MW (fotovoltaica) e Barra 352 – 3,2 MW (biomassa). Pode-se deduzir que devido à presença das fontes menos intermitentes de biomassa em todas as soluções, os custos de conexão foram reduzidos, dado o menor número de violações, especialmente para o caso da variação rápida de tensão.

O indivíduo II, de AMM, possui avaliação 5,98 MR\$ – 2514 kWh/dia e genótipo: Barra 367 – 0,5 MW (fotovoltaica), Barra 468 – 0,5 MW (fotovoltaica) e Barra 632 – 1,2 MW (biomassa). Observa-se novamente que este indivíduo é capaz de reduzir as perdas em 40% e que este indivíduo, que é o ponto de equilíbrio desta fronteira, possui C_I e E_{Perdas} menores que o indivíduo I do caso B.

5 | CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o modelo multiobjetivo para alocação de GD é eficaz no que tange ao horizonte de planejamento da distribuição, permitindo avaliar a inserção de GD em possíveis barras e com modularizações diferentes. Isso possibilita que o planejador crie estratégias de redução do custo de implantação para o empreendedor e/ou das perdas ativas de energia, a depender do critério de tomada de decisão adotado após obtenção da fronteira de Pareto. O trabalho também evidencia a alta complexidade do planejamento de inserção de renováveis no setor de distribuição de energia.

As fontes menos intermitentes/com maior fator de capacidade obtiveram maior presença nas soluções ótimas nos casos A e B.ad. As fontes eólicas e solares modeladas neste trabalho possuem o mesmo custo de instalação, conforme TABELA 1, entretanto o fator de capacidade da fonte fotovoltaica é praticamente metade do da fonte eólica. Pode-se afirmar, portanto, que o setor elétrico deve buscar melhora tecnológica e redução de custos da fonte fotovoltaica (como já tem ocorrido) para aumentar sua competitividade.

Sugerem-se como próximos trabalhos: a investigação do custo de conexão por meio de redes neurais ou *machine learning*, de forma a acelerar e automatizar processos dentro das CoDis; e a investigação regulatória e consequentes propostas que permitam um planejamento colaborativo de inserção de GD entre CoDis e empreendedor; e a realização deste tipo de modelo proposto neste trabalho incluindo a estocasticidade das fontes.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 9. 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 25. 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 786 de 17 de outubro de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 2. 2017(a).

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 3**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 74. 2017(b).

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8.** ANEEL. Brasília, p. 90. 2017(c).

ANEEL. Brasil ultrapassa marca de 1 GW em geração distribuída. **Site da Agência Nacional de Energia Elétrica**, 19 jun. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>.

BRIGATTO, G. A. A. **Modelo de decisão multiobjetivo para a busca de estratégias ótimas de inserção de empreendimentos em geração distribuída.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 212. 2011.

BROADWATER, R. P. et al. Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution System. **Electric Power System Research**, v. 14, 1988.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Custo Marginal da Expansão (CME) - N° EPE-DEE-RE-010/2016-r0.** Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 13. 2016.

ENGELBRECHT, A. Computational Intelligence, an introduction. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007.

GONZALEZ-LONGATT, F.; FORTOUL, C. Review of the Distributed Generation Concept: Attempt of Unification. **RE&PQJ**, v. 1, n. 3, p. 281-284, March 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA); ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD).

Projected Costs of Generation Electricity - 2015 Edition. Paris: [s.n.], 2015.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2018.** Abu Dhabi. 2019.

LI, X. **Better Spread and Convergence:** Particle Swarm Multiobjective Optimization Using the Maximin Fitness Function. Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 2004. Seattle: Springer. 2004. p. 117-128.

MENCHACA-MENDEZ, A.; COELLO, C. A. **Selection Operators Based on Maximin Fitness Function for Multi-Objective Evolutionary Algorithms.** Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO 2013. Sheffield: Springer. 2013.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica.** 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1983.

REN 21. **Renewables 2017 Global Status Report.** Renewable Energy Policy Network for 21st Century. Paris, p. 302. 2017. (978-3-9818107-6-9).

ZANIN JÚNIOR, P. S. **Modelo multiobjetivo de alocação e dimensionamento de geração distribuída para redes de distribuição.** Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 190. 2019.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p. ISBN 978-85-7975-052-6.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Automação 10, 64, 94, 120, 133, 165, 204, 216, 256

C

Compulsória 1, 12

Confiabilidade 2, 18, 43, 45, 47, 94, 95, 133, 163, 166, 167, 173, 176

E

Eficiência energética 10, 242, 243, 244, 250, 252

Energética 10, 1, 2, 3, 8, 13, 37, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 58, 59, 242, 243, 244, 250, 252, 253

G

Geração 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 57, 59, 61, 64, 67, 83, 166, 167, 168, 173, 177, 243, 256

Geração distribuída 28, 31, 42, 45, 166, 173, 177

Grau 1, 4, 5, 10, 30, 32, 65, 66, 137, 162, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 263

I

Ilhamento 149, 150, 161, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177

Impressão 3D 10, 204, 206

Intermitência 2, 8, 15, 16, 17, 31, 40, 43, 45, 47, 49, 50

J

Jateamento 204, 207, 212, 213, 217

M

Manta térmica 10, 242, 244, 246, 248, 249, 250, 251, 252, 253

Máquina injetora 242, 245, 246, 251

Matriz de energia elétrica brasileira 8, 1, 2

N

Novas fontes 2, 43, 49

O

Oferta 1, 3, 8, 9, 10, 16, 29, 44, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 57, 59, 167, 255

P

Paraconsistente 10, 166, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176, 178

Pesquisa 7, 11, 6, 13, 37, 42, 44, 106, 120, 165, 204, 243, 244, 253, 254, 255, 256

Processamento 129, 130, 132, 133, 134, 137, 149, 150, 161, 163, 164, 165, 177, 243, 259, 261

Produtos 11, 44, 50, 206, 253, 254, 255, 256, 264, 265, 266

Proteção 9, 24, 29, 30, 34, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 166, 167, 172, 177, 231, 241, 242, 244, 246, 248, 250, 251, 252

Proteção térmica 242, 244, 246, 248, 250, 251, 252

R

Rede neural 166, 169, 173, 175, 176, 219, 220, 223, 224

Regularização 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 220, 225

Relé inteligente 10, 166, 168, 169, 171, 174, 175

S

Sazonalidade 1, 2, 5, 8, 9, 10, 29

Segurança 8, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 25, 26, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 59, 88, 91, 92, 93, 94, 138, 166, 167, 171, 217, 231, 246

Sinais 11, 121, 122, 123, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 148, 149, 150, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 169, 172, 174, 175, 214, 245

Supermercado 11, 254, 255, 256, 268

T

Térmica 10, 1, 4, 8, 10, 11, 12, 21, 23, 44, 46, 47, 48, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 206, 230, 231, 232, 234, 242, 244, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253

Transformada de Fourier 149, 152

Transformada fracional de Fourier 9, 148, 149, 150, 157, 159, 161, 165

 **Atena**
Editora

2 0 2 0