

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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^ª Dr^ª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof^ª Dr^ª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^ª Dr^ª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

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

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof^ª Dr^ª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
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. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
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^ª Dr^ª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^ª Dr^ª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof^ª Dr^ª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^ª Dr^ª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof^ª Dr^ª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof^ª Dr^ª 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. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª 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^ª 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^ª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Ma. Liliansi Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª 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^ª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Prof^ª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª 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^ª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof^ª Dr^ª 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^ª 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^ª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Prof^ª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof^ª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Prof^ª 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

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

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

CAPÍTULO 22.....	298
TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA	
Marcelo Nogueira Tirolli	
Alexandre Borges Marcelo	
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.73421220222	
CAPÍTULO 23.....	312
A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS	
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	
DOI 10.22533/at.ed.73421220223	
CAPÍTULO 24.....	325
LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO	
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	
DOI 10.22533/at.ed.73421220224	
SOBRE OS ORGANIZADORES	343
ÍNDICE REMISSIVO.....	344

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

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 30/10/2020

Manuel Arturo Rendón Maldonado

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF,
Departamento de Energia Elétrica
Juiz de Fora - MG
<http://lattes.cnpq.br/1580115716308628>

André Reinaldo Novgorodcev Júnior

Petróleo Brasileiro S/A, CENPES
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/7999890350964466>

RESUMO: Nos últimos anos diversas usinas termelétricas foram construídas no Brasil, e o percentual de participação desse tipo de geração aumentou no mercado local de energia. Desde a década de 1980 diversos estudos desenvolveram modelos matemáticos de turbinas a gás para aplicação em análise de sistemas de potência. Trata-se de representações simplificadas do comportamento estático e dinâmico desse tipo de máquinas. No entanto, trabalhos publicados em modelos dinâmicos de turbinas a gás conseguem representar somente um conjunto estreito de modelos de máquinas, e a maioria das aplicações em análise de sistemas de potência emprega tais modelos, apesar de não serem representações precisas de outras máquinas mais específicas. Este trabalho apresenta o procedimento de modelagem e validação para uma turbina a gás de tipo industrial de 106 MW, operando em ciclo combinado em uma usina termelétrica brasileira.

A abordagem empregada foi de tipo caixa cinza, baseada em um modelo pré-existente que foi ajustado com dados reais amostrados. A modelagem reproduz o comportamento estático em estado estacionário, e o comportamento dinâmico calculado usando identificação do sistemas a partir de dados amostrados. Tais dados foram previamente corrigidos para as condições ambientais padrão. O modelo foi desenvolvido e validado em MATLAB-Simulink.

PALAVRAS - CHAVE: Modelagem de sistemas de potência; geração termelétrica; termoelectricidade; turbina a gás; turbogerador.

1 | INTRODUCTION

In 2005, 85.1% of the Brazilian total power generation was from hydroelectric power stations, whereas only 3.1% was from natural gas-fueled thermal power stations. In 2016, such percentages were 65.2% and 13%, respectively. A 38%-increase in the thermal power generation was due to the natural gas-fueled generation (Tolmasquim et al., 2016). The National Electric System Operator (ONS) reported a growth of 448% in thermoelectric power generation in the period 2002 to 2012 (ONS, 2013).

Combined Cycle Power Plants (CCPPs) have advantages over non-combined cycle power plants such as higher efficiency, lower emissions, shorter installation and operation times, lower initial costs, and fuel flexibility. CCPP operations include frequent startup/

shutdown, which must be optimized through model-based analyses (Ferreira, 2015; Tică et al., 2012).

Models for CCPPs are commonly based on the Modelica language, or other suitable simulation platforms, so as to provide for optimization studies (Tică et al., 2012).

1.1 Modeling of Gas Turbines

The Gas Turbine (GT) is an important component of a CCPP, and its appropriate modeling is mandatory (Shalan et al., 2010). A commonly employed modeling technique is the gray-box identification supported by nonlinear approaches such as Wiener modeling, NARX structures, artificial neural network-based modeling, multivariable model predictive control, or hybrid fuzzy models. Some works employed behavioral modeling in contrast (Pires et al., 2018; Meyer et al., 2015; Mohammadi and Montazeri-Gh, 2015; Asgari et al., 2014). Also, some researchers employed their own nonlinear model simulation frameworks, or developed simplified physics-based models (Gülen and Kim, 2014). For example, W. I. Rowen provided a simplified dynamic model for a simple cycle, single shaft power generation GT, aiming at carrying out power system stability studies (Rowen, 1983).

Regarding power generation, heavy-duty GTs operate in simple cycle with an efficiency of about 36%, whereas they may reach an efficiency of about 58% in combined cycle operation. In such applications, the GTs must respect the operating limitations of the Heat Recovery Steam Generator (HRSG) (Kehlhofer et al., 2009).

1.2 Models for Combined Cycle Power Plants

Some mathematical models of GTs are composed of equations of thermal, mass, and energy balance for dynamic simulations in MATLAB®-Simulink® (Asgari et al., 2014).

The GT of a typical CCPP is equipped with a variable Inlet Guide Vane (IGV) that adjusts the airflow to maintain a high exhaust gas temperature. Load optimization is the primary function of the modulating IGV control (Rowen, 1992). The control loop for exhaust gas temperature is taken into account in the model. Rowen (1992) presented this model as the block diagram reproduced in Figure 1.

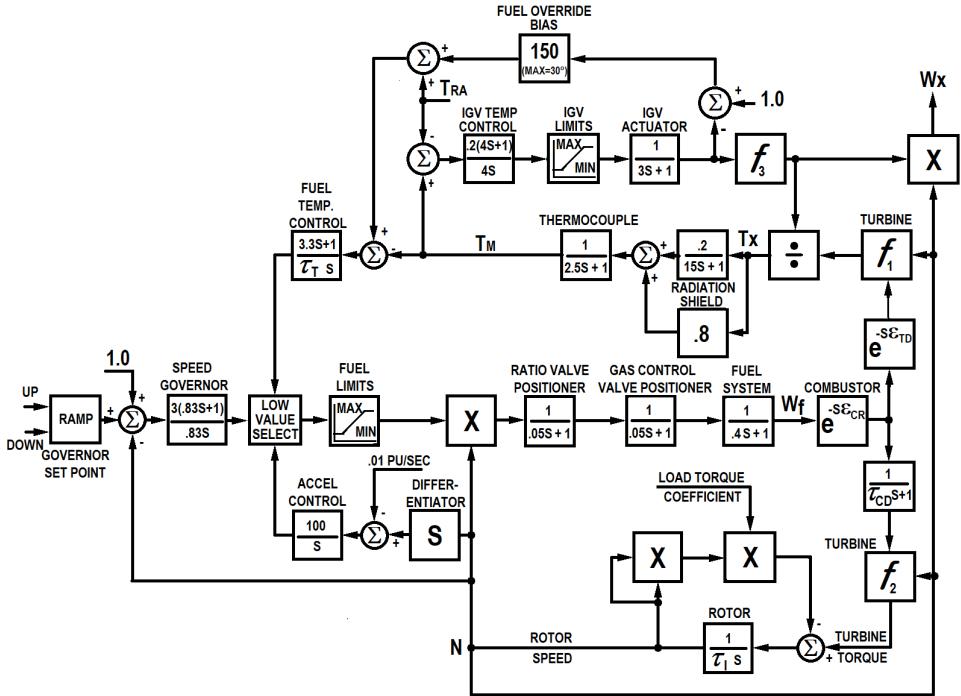


Figure 1. Simplified Representation of Single-Shaft Mechanical Drive Gas Turbine (Rowen, 1992)

Closing the IGV decreases the airflow, decreases fuel-to air ratio in the combustion chamber and causes the exhaust temperature to increase approximately in inverse proportion to the airflow change (Massucco et al., 2011).

A later work showed this model applied for power generation in CCGT applications (Yee et al., 2008), see Figure 2. It has been used in several studies regarding CCGTs, including the present work.

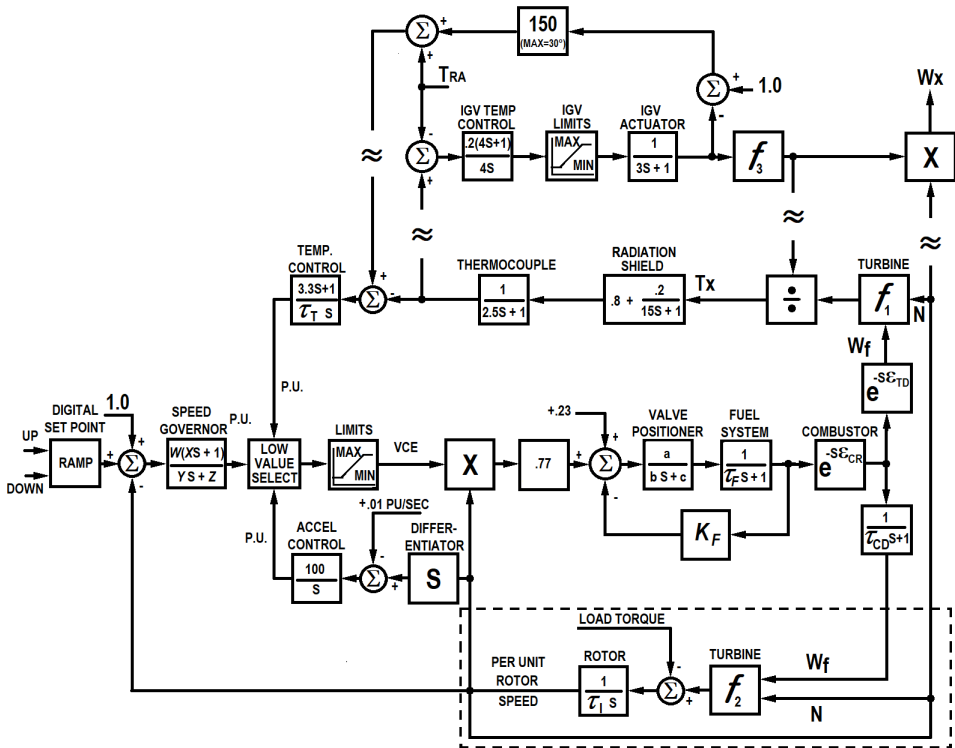


Figure 2. Model for CCGP applications (Yee et al., 2008)

2 I POWER PLANT DESCRIPTION

The present study analyzes a CCGP facility of 1.040 MW total capacity, installed near an oil refinery in the state of Rio de Janeiro, Brazil. It is composed of three thermal power generation blocks, each one equipped with two GTs, two HRSGs, and one Steam Turbine (ST).

The model of the GT of the CCGP (Block I) is presented in the following diagram (Figure 3). It is a heavy-duty industrial GT GT11N2, manufactured by Alstom. It has silo-type combustion chamber, 14-stage compressor with pressure ratio of 16:1, 4-stage turbine, air-cooled in the first two stages, and IGV (ALSTOM, 2005).

The studied GT has nominal power of 115 MW (ALSTOM, 2001). The IGV allows the GT to maintain a high exhaust gas temperature, i.e. the Temperature After Turbine (TAT), in a significant range of operation.

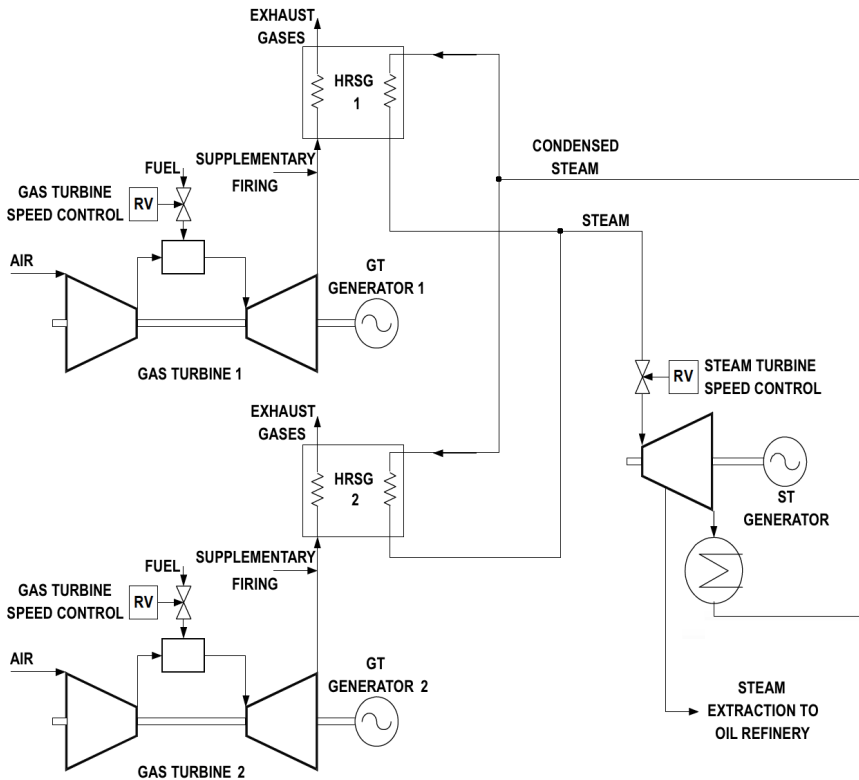


Figure 3. Schematic Diagram of Block I

3 I GAS TURBINE MODEL AND SIMULATION

Previous works already presented models for the thermal power block of the studied CCPP. Some of them show simulation results combined with the results produced by the computer analysis tool called ANATEM. Those simulations supported the stability analysis of the power system near the studied CCPP under several disturbance conditions (Rendón et al., 2015, 2014). A detailed of the stability analysis of the power system in a possible islanding, using electromechanical simulation in ANATEM with the support of a software tool developed by the research team, can be reviewed at (Marcato et al., 2015).

Model variables change according with the environmental conditions, such that design values must be defined in order to correct values of environmental variables (Volponi, 1999). In this work, sampled data were corrected to the standard ambient conditions: 22°C and 101 kPa (ALSTOM, 2001).

The model variables are in '1.0 Per Unit' (pu) values, the decimal equivalent of the design value. It consists of dividing a given quantity by its base value in the same unit and order (Anderson, 1995). Since the model represents the dynamic energy conversion between components, variables such as W_f and W_x were calculated in energy flow units

[J/s]. Table 1 presents the base values for the present work.

Depiction	Design Value	Unit
GT Fuel Flow W_f Base ^a	342.4	MJ/s
GT Power Generation Base ^b	106.1	MW
GT Speed N Base	3600.0	rpm
GT Exhaust Gas Flow W_f Base ^c	366.0	MJ/s
GT <i>Torque</i> Base ^d	281.4	N.m

Table 1. Base Design Values at 22°C and 101 kPa

^a Converted from mass flow with Low Heat Value (LHV). ^b Nominal power by catalog is 115 MW (ALSTOM, 2005). ^c Calculated with DESTUR (Avellar, 2010). ^d Calculated from power generation and speed.

The model includes the control laws for two operating conditions, either i) isolated or ii) in parallel with the power grid, and may be observed in Figure 2. It is based on the gray-box method, i.e. derived from physical relations (first principles) whose coefficients are adjusted so that the model responses are able to fit real sampled data. It was necessary to obtain data in several operating conditions, with load variations from no load to full load. Most of the blocks were validated with sampled data in steady state conditions.

Samples and technical documentation by Alstom helped to calculate the TAT limit (T_i) of 540°C, Turbine Inlet Temperature (TIT) part load limit of 1065°C, TIT base load limit of 1085°C, and IGV limits from -41°C to 5°C (ALSTOM, 2001). The available sampling time was 1s. Table 2 provides details about the sensors of the CCP.

Depiction	Sensor	Units	Deviation	Symbol
SPEED	gen. meter	rpm	±1%	N
TAT	thermocouple	°C	±1%	TAT
IGV COMM.	digital	°C		IGV _c
IGV POS.	potentiometer	°C		IGV
AMB. PRESS.	capacitive		±1%	p_a
AMB. TEMP.	PT100	°C	±2%	T_a
FUEL FLOW	turbine meter	kg/s	±1%	W_f
FUEL LHV	gas analyzer	kJ/s	±1%	
TIT	calculated	°C	±2%	TIT
GEN. POWER	wattmeter	MW	±1%	

Table 2. Sensor Information (ALSTOM, 2005)

The exhaust gas flow W_x was calculated with the aid of DESTUR, a software developed in FORTRAN and dedicated for GT analysis (Avellar, 2010). The torque was determined in steady state conditions relying upon data from the electric generator power

and N , and an estimation of GT electric generator efficiency from zero to full load (ALSTOM, 2005).

4 I GAS TURBINE MODELING PROCEDURE

The employed procedure consisted in the following steps:

- (1) To correct GT data to standard environmental conditions (Volponi, 1999), and calculate the variables which are not measured in the CCPP system, as mentioned in Section 3;
- (2) To convert GT data of *Set Point (SP)*, fuel flow (W_p), torque, speed (N), and W_x to pu representation using the base values in Table 1;
- (3) To adjust the parameters in the blocks for TAT control by IGV for limits: -41°C to 5°C for *IGV* and 0.46 to 1 for L_{igv} ;
- (4) To define the 'REFERENCE TEMPERATURE' equation using the standard temperature condition (22°C);
- (5) With the standard temperature T_a , *IGV* limits (-41°C to 5°C), and steady state data for *IGV*, power generated, W_p , W_x , and N using least squares method to calculate the parameters of equation f_{1-GT} ;
- (6) From corrected data, to calculate the no load fuel demand (W_{min});
- (7) To adjust parameters in the equation f_{2-GT} using data from W , N , and torque in steady state conditions;
- (8) To calculate the inertia rotor time constant T_I , as well as values for 'droop' and K_D , based on the information from the ONS;
- (9) To use steady state data for L_{igv} and W_x , as well as the least squares method, to calculate the equation f_{3-GT} ;
- (10) To determine values for the 'IGV TEMPERATURE CONTROL' block based on dynamic values for L_{igvc} command and L_{igv} position;
- (11) To correct the parameters in the blocks 'IGV ACTUATOR' and 'THERMOCOUPLE' based on dynamic data from load variations;
- (12) To correct the parameters in the blocks 'VALVE POSITIONER', 'FUEL SYSTEM', 'COMBUSTOR', 'TURBINE DISCHARGE', 'COMPRESSOR DISCHARGE', and acceleration control loop based on the analysis results of the load rejection test;
- (13) To validate the first approach model with several sets of data.

The validated model is shown in Figure 4.

The 'DIGITAL SET POINT' is the power demand sent to the GT. It is defined by the 'droop' in the 'SPEED GOVERNOR' block. In the present work, a 'droop' condition of 5% was defined based on the ONS' information. The value $K_D = 1/droop = W = 1/0.05 = 20$ is

used in the ‘SPEED GOVERNOR’ block.

Table 3 shows the calculated parameters for the validated model in Figure 4.

Depiction	Value	Units	Depiction	Value	Unit
$a;b;c$	1;0.1;1		T_a	22.00	$^{\circ}\text{C}$
$W;X$	$K_D;0$		τ_T	250.00	s
$Y;Z$	0.5;1		Max VCE ¹	1.50	pu
'droop'	0.05		Min VCE ¹	-0.10	pu
K_D			T_r	540.00	$^{\circ}\text{C}$
τ_f	0.80	s	τ_I	17.65	s
K_f	0.00		Max L_{igvc}	1.00	pu
$\mathcal{E}CR$	0.01	s	Min L_{igvc}	0.46	pu
$\mathcal{E}TD$	0.04	s	Max IGTV	5.00	$^{\circ}\text{C}$
τ_{CD}	0.40	s	Min IGTV	-41.00	$^{\circ}\text{C}$

¹ VCE is the Fuel Command (Figure 4)

Table 3. Parameters of the Validated Model

The expression of f_{1-GT} is given by

$$T_x = \frac{num}{W_x(1+0.005(22-T_a))} \quad (1)$$

where

$$num = 0.29(5 - IGTV) + 0.745(1 - W_f) - 453(N^2 - 2.6162N + 1.6341) \quad (2)$$

where

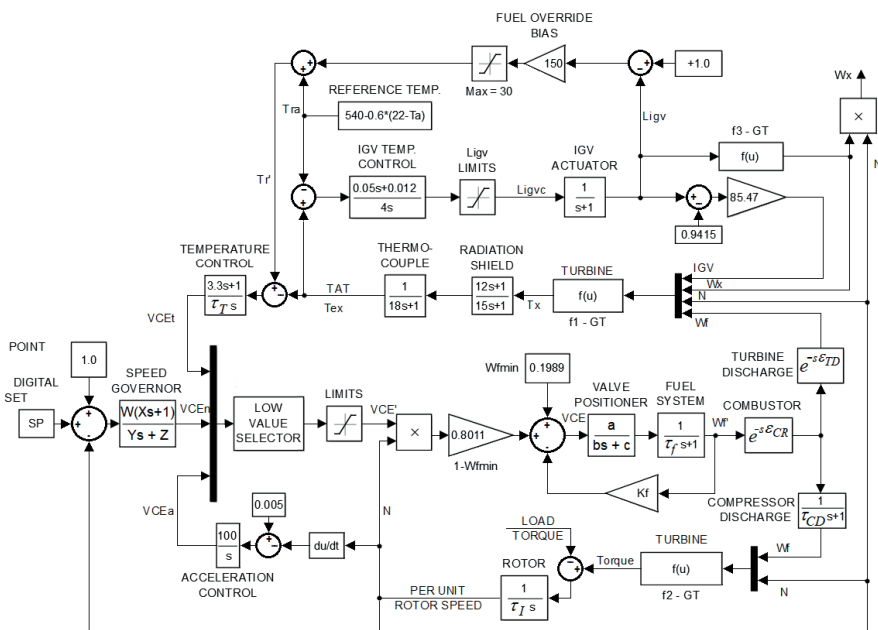


Figure 4. GT validated model in 'droop' mode with IGTV control

Since all data was recorded with N around 1 pu, parameters in (1) and (2) remained the same as in Rowen (1992).

The expression of f_{2-GT} is given by

$$torque = 1.2483(W_f - 0.1989) + 0.5(1 - N) \quad (3)$$

which is similar to that in Yee et al. (2008), and has the same structure as in Rowen (1983). The role and influence of N in the equation remained unaltered.

The expression of f_{3-GT} is given by

$$W_x = \left(\frac{295.15}{T_a + 273.15} \right) L_{igv}^{0.572} \quad (4)$$

where the exponential coefficient was calculated through the application of the least squares' method to the steady state data from several conditions of operation. The parameters were adjusted to $T_a = 22^\circ\text{C}$.

5 I GAS TURBINE VALIDATION RESULTS

5.1 Load Rejection Tests

The load rejection test was carried out in order to calculate the dynamic parts of some model blocks. During the test, the GT suffered a sudden loss of charge in the electric generator output. The supervisory system detected the event and switched the control mode from 'droop' to 'isochronous', to cope with the axis speed regulation.

By using the graphical results from two load rejection tests, the time constants of blocks 'FUEL SYSTEM', 'COMPRESSOR DISCHARGE', 'IGV TEMPERATURE CONTROL', and 'IGV ACTUATOR', as well as the reference in acceleration control loop, were all adjusted.

The 'isochronous' Proportional-Integral (PI) control law in the 'SPEED GOVERNOR' block was adjusted such as

$$VCE_n(s) = \left(\frac{3.5s + 1.4}{s} \right) \Delta N \quad (5)$$

5.2 GT Validation Cases

The control system regulates two variables concurrently:

i) *torque* (output power) and TAT. The first one follows the power demand SP , whereas the other is kept most of the time at its maximum (540°C) through the IGV adjustment. Both of them are controlled independently, in such a way that the required power is generated and the TAT is maintained at its maximum, except for lower loads. The GT efficiency is not affected by the operation of the IGV.

Three data sets (cases) were selected regarding power variations from no load to full load. Data were available at the sampling time of 1 s. Figures 5–7 present such data

sets. Solid lines correspond to real data, whereas dotted lines correspond to data from simulations. There is no real data to validate W_x .

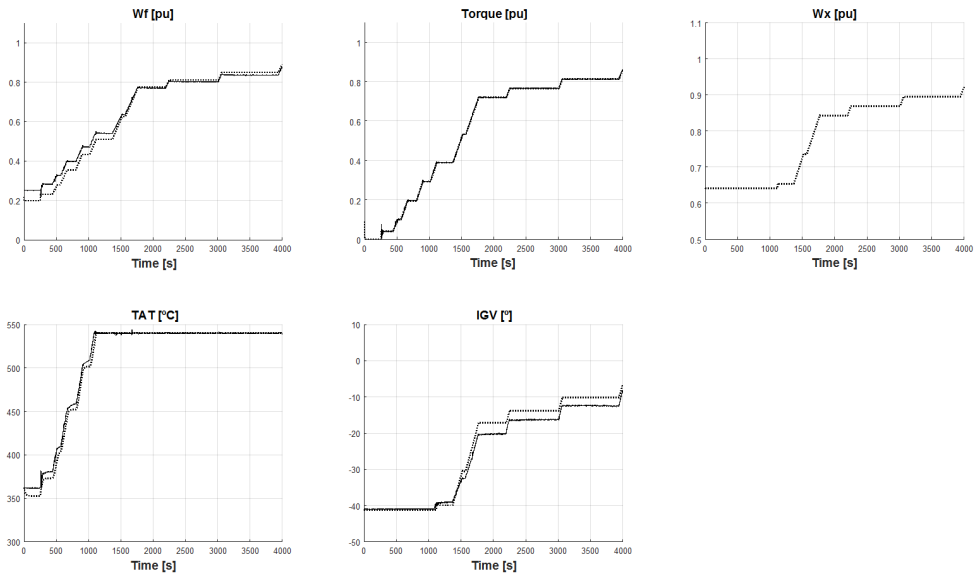


Figure 5. Validation Results — Case 1

Case 1: Measurements were carried out on March 21st, 2013 during a 4000 s-long experiment in which the generated power was raised from 0 to 89.85 MW in several steps. Figure 5 shows that the torque matched satisfactorily, therefore it is well validated. As regards W_f and TAT, they did not match satisfactorily near to the no load condition, but they matched in the opposite condition, i.e. full load, therefore they present a relatively poor validation. IGV presents a poor validation in intermediary loads. This fact could be foreseen by estimating the nonlinear behavior of IGV with respect to the output power. At last, W_x followed the behavior of IGV.

The TAT graph helps to understand how the control through IGV works. From the instant 1100 s on, increasing the load, as well as the *torque* beyond 0.4 pu, does not affect the temperature, which is kept at 540°C.

It is observed that TAT and IGV present additional behaviour related with the control strategy, that the employed model could not represent.

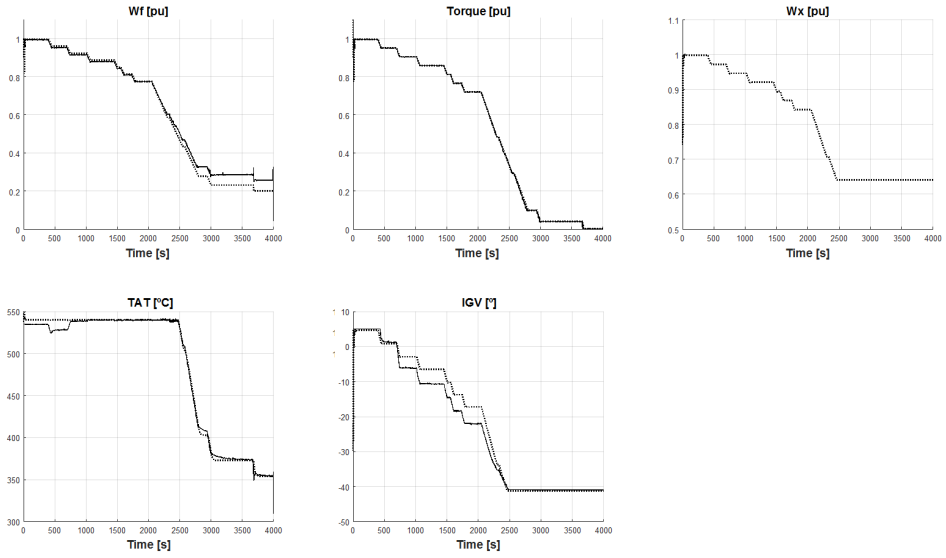


Figure 6. Validation Results — Case 2

Case 2: Measurements were carried out between 04:16:40 and 05:23:19 on April 30th, 2014 during another 4000 s-long experiment. In this case, the output power started at 104.97 MW and was lowered down to zero. Computer simulations were also performed along with it. Figure 6 presents comparisons of results obtained from both of them. As in the previous case, W_f presents a poor validation near the no load condition, whereas TAT presents a poor validation between 500 and 800 s. As regards the IGV, it presents a poor validation in intermediary loads again.

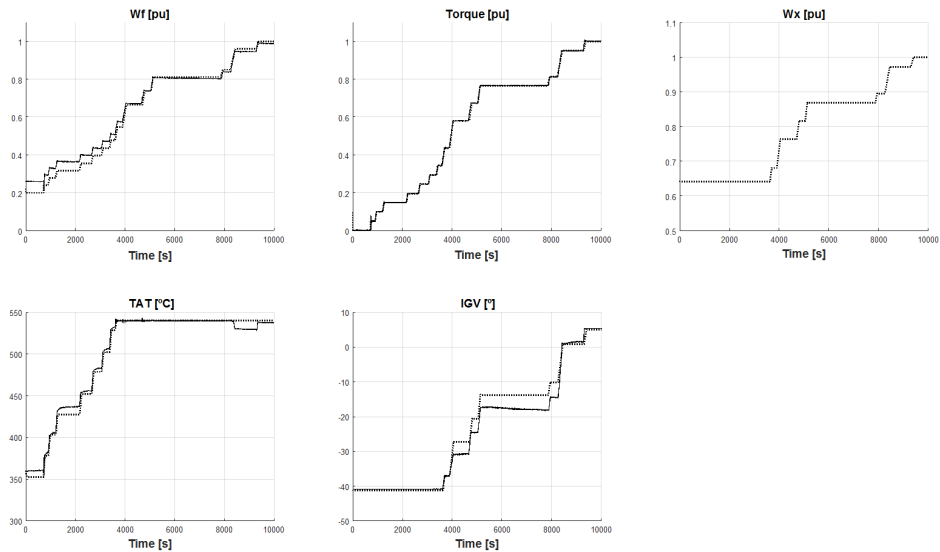


Figure 7. Validation Results — Case 3

Case 3: More measurements were carried out between 04:06:40 and 06:53:19 on July 22nd, 2013 during yet another 10000 s-long experiment. Computer simulations were also performed along with it. Figure 7 presents comparisons of results obtained from both of them. It is possible that the behaviors of variables W_p , torque, TAT, and IGV just confirm the previously presented results.

6 | CONCLUSIONS

Present works states some critical aspects related with modeling a heavy duty GT from sampled data. The studied machine presented a behaviour on its IGV control dynamics that could not be properly represented by the model structure, as observed in Figures 5, 6, and 7. This demonstrates that the structures usually employed in power system analysis do not adequately represent machines with specific behaviors. Future developments will modify the actual model structure, aiming to obtain a more reliable representation.

Developing dynamic models for GT in CCPP from sampled data is not an easy task, because obtaining useful validation data is hard to accomplish. It must be guaranteed dynamic load variation and proper data sampling. Besides that, it must be looked for reliable accuracy of the measurements.

The model focuses on the dynamic behavior of the GT equipped with IGV, as a component of a CCPP. The simplified representation favored the understanding of the dynamic behavior of variables and related control loops. Since the values of most of the model parameters were obtained from the literature, some adjustments were variables

to standard ambient conditions. It was necessary needed to guarantee consistency with the modeled plant. to adjust the reference temperature to the chosen standard ambient temperature (22°C), as well some coefficients in Defining the base values of model variables for pu calculation was mandatory, as well as to convert the values of the equations involving temperatures, since some of them were presented in °F.

The presented simulation results offer a clear view of the operation of the three control loops, as well as that of the minimum value selector in events of power demand variations. Most of the time, the speed controller rules the fuel demand (VCE), except in i) full power conditions, where the exhaust temperature controller limits the generated power, or ii) in abrupt load variations, where acceleration and temperature control loops may command VCE transiently. IGV control loop keeps the TAT at its maximum disturbing neither the power generation nor the efficiency of the GT. Acceleration and temperature control laws have each an integrating pole in their controllers. Most of the time, the speed control prevails (minimum value selector), and control signals VCE_a and VCE_t tend to grow indefinitely, making it necessary to limit them.

REFERENCES

- ALSTOM (2001). **Operation concept for the ALSTOM gas turbines GT11N2-EV. Technical report**, ALSTOM. ALSTOM (2005). Overall plant operation and control concept of the cogeneration plant. Technical report, ALSTOM.
- Anderson, P.M. (1995). **Analysis of faulted power systems**. Wiley-IEEE Press, 1st edition.
- Asgari, H., Venturini, M., Chen, X., and Sainudiin, R. (2014). **Modeling and simulation of the transient behavior of an industrial power plant gas turbine**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 136(6), 061601. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4026215>.
- Avellar, V.P. (2010). **Transient modelling of industrial gas turbine for power generation**. Master's thesis, Pontifical Catholic University – PUC, Rio de Janeiro, Brazil.
- Ferreira, B.M. (2015). **Modelagem de plantas de ciclo combinado para simulação integrada de transitórios eletromecânicos e termodinâmicos** (in Portuguese). Master's thesis, Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil.
- Gulen, S.C. and Kim, K. (2014). **Gas turbine combined cycle dynamic simulation: a physics based simple approach**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 136(1), 011601. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4025318>.
- Kehlhofer, R., Hannemann, F., Stirnimann, F., and Rukes, B. (2009). **Combined-cycle gas & steam turbine power plants**. Pennwell Books, 3rd edition.

Marcato, A.L.M., Rendón, M.A., Novgorodcev Jr., A.R., Tomim, M.A., Alves, M. A. da C., Assato, M., Filho, J.A.P., Silva, E.C.M., Rocha, F.G., Biundini, I.Z., and Silva Jr., I.C. (2015). **Modelagem do sistema elétrico e térmico de uma UTE em ciclo combinado com cogeração** (in Portuguese). In Proceedings of the Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL 2015. Brazilian National Electric Energy Agency – ANEEL, Costa do Sauípe, Brazil.

Massucco, S., Pitto, A., and Silvestro, F. (2011). **A gas turbine model for studies on distributed generation penetration into distribution networks**. IEEE Transactions on Power Systems, 26(3), 992–999. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2091290>.

Meyer, R.T., DeCarlo, R.A., Pekarek, S., and Doktorcik, C. (2015). **Gas turbine engine behavioral modeling**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 137(12), 122606. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4030838>.

Mohammadi, E. and Montazeri-Gh, M. (2015). **A new approach to the gray-box identification of Wiener models with the application of gas turbine engine modeling**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 137(7), 071202. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4029170>.

ONS (2013). **Thermoelectric energy records database in Brazil**. URL <http://www.ons.org.br>. Accessed: 201610-30.

Pires, T.S., Cruz, M.E., Colaço, M.J., and Alves, M. A. da C. (2018). **Application of nonlinear multivariable model predictive control to transient operation of a gas turbine and NOx emissions reduction**. Energy, 149, 341–353. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.042>.

Rendón, M.A., Nascimento, M. A. R. do, and Mendes, P.P.C. (2014). **Analyzing the impact of using biodiesel in the parameters of a 30 kW micro-turbine control model**. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, 467–476. American Society of Mechanical Engineers – ASME. doi: <https://doi.org/10.1115/GT2006-91259>.

Rendón, M.A., Novgorodcev Jr., A., Biundini, I.Z., and Malateaux, E.C. (2015). **Dynamic modeling of combined cycle generation: gas turbine, boiler and steam turbine**. In Proceedings of the 2015 ASME-ATI-UIT Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment. American Society of Mechanical Engineers – ASME.

Rowen, W.I. (1983). **Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 105(4), 865–869. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3227494>.

Rowen, W.I. (1992). **Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service**. In Proceedings of the 1992 ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, volume 5, V005T15A001. Cologne, Germany. doi: <https://doi.org/10.1115/92-GT-022>.

Shalan, H., Hassan, M.M., and Bahgat, A. (2010). **Comparative study on modelling of gas turbines in combined cycle power plants**. In Proceedings of the 2010 14th international middle east power systems conference (MEPCON). Cairo, Egypt.

Tică, A., Guéguen, H., Dumur, D., Faille, D., and Davelaar, F. (2012). **Design of a combined cycle power plant model for optimization**. Applied Energy, 98, 256–265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.032>.

Tolmasquim, M.T., Guerreiro, A., Oliveira, R.G.de., Achão, C., Stilpen, D., Santini, L., Matos, R., and Goulart, J. (2016). **Balço energético nacional** (in Portuguese). Technical report, Empresa de Pesquisa Energética, EPE. URL <https://ben.epe.gov.br/>.

Volponi, A.J. (1999). **Gas turbine parameter corrections**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 121(4), 613–621. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2818516>.

Yee, S.K., Milanovic, J.V., and Hughes, F.M. (2008). **Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies**. IEEE Transactions on Power Systems, 23(1), 108–118. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.907384>.

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