

A close-up photograph of a hand holding a grey probe, testing a component on a circuit board. The background is blurred, showing other electronic components and a glowing light. The image is overlaid with a brown, textured diagonal band.

Lilian Coelho de Freitas
(Organizadora)

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

Lilian Coelho de Freitas
(Organizadora)

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecário

Maurício Amormino Júnior

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Karine de Lima Wisniewski

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 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.

A Atena Editora não se responsabiliza por eventuais mudanças ocorridas nos endereços convencionais ou eletrônicos citados nesta obra.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação.

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
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto 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
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. 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
Profª Drª 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
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. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves -Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa 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
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

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

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. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª 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
Profª 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. 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
Profª 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
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/UFGA
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
Profª Ma. Lillian 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. Dr. 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. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará

Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco

Profª 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

Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão

Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo

Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana

Profª 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

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecário Maurício Amormino Júnior
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Vanessa Mottin de Oliveira Batista
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadora: Lilian Coelho de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica e de computação: atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 4 / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-459-7

DOI 10.22533/at.ed.597200610

1. Engenharia elétrica. 2. Computação. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A Atena Editora apresenta o *e-book* “*Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico 3*”. O objetivo desta obra é mostrar aplicações tecnológicas da Engenharia Elétrica e de Computação na resolução de problemas práticos, com o intuito de facilitar a difusão do conhecimento científico produzido em várias instituições de ensino e pesquisa do país.

O *e-book* está organizado em dois volumes que abordam de forma categorizada e interdisciplinar trabalhos, pesquisas e relatos de casos que transitam nos vários caminhos da Engenharia Elétrica e de Computação.

O Volume III tem como foco aplicações e estudos de atividades relacionadas à Computação, abordando temas variados do *hardware* ao *software*, tais como automação e robótica, arquitetura de redes, Internet, computação em névoa, modelagem e simulação de sistemas, entre outros.

O Volume IV concentra atividades relacionadas ao setor elétrico e eletrônico, abordando trabalhos voltados para melhoria de processos, análise de desempenho de sistemas, aplicações na área da saúde, entre outros.

Desse modo, temas diversos e interessantes são apresentados e discutidos, de forma concisa e didática, tendo como base uma teoria bem fundamentada nos resultados práticos obtidos por professores e acadêmicos.

Boa leitura!

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

DESEMPENHO DE ISOLADORES SOB CHUVAS INTENSAS

Darcy Ramalho de Mello

DOI 10.22533/at.ed.5972006101

CAPÍTULO 2..... 15

TRAVESSIA DO RIO AMAZONAS E SUPERAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA: PROJETO ESTRUTURAL E DESAFIOS CONSTRUTIVOS

Juliana Nobre de Mello Motta

Roberto Luís Santos Nogueira

Luiz Carlos Mendes

Mariana Souza Rechtman

Renata Cristina Jacob de Jesus

DOI 10.22533/at.ed.5972006102

CAPÍTULO 3..... 27

PIRTUC: 15 ANOS DEPOIS - AVALIAÇÃO DAS AÇÕES DE INSERÇÃO REGIONAL DA UHE TUCURUÍ

Sílvia Maria Frattini Gonçalves Ramos

Rosana dos Santos Brandão

DOI 10.22533/at.ed.5972006103

CAPÍTULO 4..... 41

PLANO DE CORTE MANUAL DE CARGA

Anderson Siqueira Nogueira

Rodrigo Damasceno Souza

Marcelo de Calazans Barcelos

Suellen Karine Braga Vieira

Walmir de Oliveira Campos

DOI 10.22533/at.ed.5972006104

CAPÍTULO 5..... 53

PROCEL RELUZ – ILUMINAÇÃO PÚBLICA E SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA EFICIENTES

Adjeferson Custódio Gomes

Adi Neves Rocha

Fabiano Rodrigues Soriano

Luís Ricardo Cândido Cortes

Taís Mirele Fernandes da Silva

Thiago Luís Campos Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.5972006105

CAPÍTULO 6..... 66

PRODUÇÃO EFICIENTE DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM CUSTO OPERACIONAL REDUZIDO

Igor Ferreira do Prado

Taís Mirele Fernandes da Silva
Marcelo Bento Pisani
Rodrigo Dórea da Silva
DOI 10.22533/at.ed.5972006106

CAPÍTULO 7..... 77

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM: BREVE PANORAMA

Adjeferson Custódio Gomes
Fabiano Rodrigues Soriano
Fábio Alexandre Martins Monteiro
Luís Ricardo Cândido Cortes
Victor Santos Matos
Vinícius de Souza Andrade Wanderley

DOI 10.22533/at.ed.5972006107

CAPÍTULO 8..... 88

REPRESENTAÇÃO DE MODELOS RACIONAIS NO PROGRAMA ATP

Sergio Luis Varricchio

DOI 10.22533/at.ed.5972006108

CAPÍTULO 9..... 100

**UMA PROPOSTA PARA A IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DOS FENÔMENOS
VTCDS EM INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS SUPRIDAS POR
TRANSFORMADORES DELTA-ESTRELA ATERRADA**

Adrian Ribeiro Ferreira
José Carlos de Oliveira
Paulo Henrique Oliveira Rezende

DOI 10.22533/at.ed.5972006109

CAPÍTULO 10..... 113

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA
BAHIA**

Adjeferson Custódio Gomes
Fabiano Rodrigues Soriano
Giovanna Buscatti Gonçalves
Luís Ricardo Cândido Cortes
Victor Santos Matos
Vinícius de Souza Andrade Wanderley

DOI 10.22533/at.ed.59720061010

CAPÍTULO 11..... 129

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO HIDRO-SOLAR AUXILIADO POR UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA FORMA DE HIDROGÊNIO JUNTO À USINA
HIDROELÉTRICA DE MANSO**

Juarez Corrêa Furtado Júnior
Ennio Peres da Silva
Vitor Feitosa Riedel
Demóstenes Barbosa da Silva

Diogo Oliveira Barbosa da Silva
Ana Beatriz Barros Souza
Hélio Nunes de Souza Filho

DOI 10.22533/at.ed.59720061011

CAPÍTULO 12..... 146

ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Mateus Camargo Franco
Eduardo Machado dos Santos
Alex Itczak
Arian Rodrigues Fagundes
Artur Henrique Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.59720061012

CAPÍTULO 13..... 160

DESENVOLVIMENTO DE FUNCIONALIDADES COMPUTACIONAIS PARA ATENDIMENTO DOS NOVOS PROCEDIMENTOS DE REDE PARA ESTUDOS DE DESEMPENHO HARMÔNICO

Cristiano de Oliveira Costa
Sergio Luis Varricchio
Franklin Clement Véliz
Fabiano Andrade Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.59720061013

CAPÍTULO 14..... 174

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Guilherme Gomes dos Santos
Paulo Sérgio Zanin Júnior

DOI 10.22533/at.ed.59720061014

CAPÍTULO 15..... 188

APRENDIZADO AUTODIDATA DA LÍNGUA INGLESA

Lucas Eid Ramire Gonçalves
Luiz Eduardo Vieira Montanha
Marco Antonio Nagao

DOI 10.22533/at.ed.59720061015

CAPÍTULO 16..... 193

MODELAGEM DE PROCESSOS: UMA PROPOSTA DE MELHORIA PARA A ATUAÇÃO DAS EQUIPES DE SAÚDE DA ATENÇÃO BÁSICA

Ana Carla do Nascimento Santos
Jislane Silva Santos de Menezes
Almerindo Nascimento Rehem Neto
Adriana de Melo Fontes
Gilson Pereira dos Santos Júnior
Jean Louis Silva Santos

Cristiane Oliveira de Santana

DOI 10.22533/at.ed.59720061016

SOBRE A ORGANIZADORA.....	206
ÍNDICE REMISSIVO.....	207

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 02/08/2020

Guilherme Gomes dos Santos

Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás

<http://lattes.cnpq.br/4258035966944269>

Paulo Sérgio Zanin Júnior

Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás

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

RESUMO: Quando ocorre um curto-circuito em máquinas síncronas, correntes são induzidas no enrolamento de forma a compensar os fluxos concatenados, surgindo assim parâmetros visíveis no oscilograma. Este trabalho permite verificar os parâmetros da máquina síncrona e analisar seu comportamento no distúrbio por meio de modelagem computacional, a qual utiliza o conceito das equações de Park, reatâncias operacionais e constantes de tempo. Apresenta-se um estudo de caso e comparação dos resultados obtidos com parâmetros de uma máquina real.

PALAVRAS-CHAVE: Curto-circuito; máquina síncrona; reatância; extração de parâmetros.

SYNCHRONOUS MACHINES PARAMETERS EXTRACTION BY SHORT- CIRCUIT COMPUTATIONAL SIMULATION

ABSTRACT: When a short circuit occurs in

synchronous machines, currents are induced in the winding in order to compensate the concatenated flux, thus resulting in visible parameters in oscillogram. This work allows synchronous machine parameters verification and its behavior analysis during a disturb by computational modeling, using the following concepts: Park equations, operational reactances and time constants. It is presented a study case and the comparison between obtained results and real machine parameters.

KEYWORDS: Short circuit; synchronous machine; reactance; parameter extraction.

NOMENCLATURA

P Número de par de pólos.

V_{qd} Componentes da tensão de estator.

I_{qd} Componentes da corrente de estator.

v_{qs}^r Tensão do eixo de quadratura no referencial do rotor.

v_{ds}^r Tensão do eixo de direto no referencial do rotor.

ψ_{qs}^r Fluxo concatenado em eixo quadratura no referencial do rotor.

ψ_{ds}^r Fluxo concatenado em eixo direto no referencial do rotor.

i_{ds}^r Corrente do estator no eixo direto no referencial do rotor.

i_{qs}^r Corrente do estator no eixo de quadratura no referencial do rotor.

v_{fd}^{tr} Derivada da Tensão do eixo magnético direto.

- v_{kqz}^{tr} Derivada da Tensão do eixo magnético quadratura.
- ω_r Velocidade angular do rotor.
- ω_b Velocidade angular de base elétrica.
- ρ Derivada no tempo.
- $X_q(s)$ Impedância operacional do eixo q.
- $X_d(s)$ Impedância operacional do eixo d.
- X_{md} Impedância de magnetização de eixo direto.
- X_{mq} Reatância de magnetização de eixo de quadratura.
- X_{is} Reatância de dispersão.

1 | INTRODUÇÃO

A máquina síncrona trifásica é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e um fluxo de corrente contínua (CC) de rotor é produzido por uma excitação CC no enrolamento do campo ou por ímãs [1]. Ela é constituída basicamente de 3 enrolamentos, cujos eixos magnéticos estão defasados de 120° elétricos ao longo do perímetro do entreferro, definindo o estator. Internamente, há um enrolamento em torno de um núcleo de ferro alimentado por corrente contínua que produz um fluxo magnético estático, definindo o rotor, também chamado de enrolamento de campo ou de excitação [6]. É uma máquina em corrente alternada, no qual seu campo girante está em sincronismo com o rotor. Esse tipo de máquina é usado principalmente para converter energia mecânica em elétrica.

O comportamento elétrico e eletromecânico da maioria das máquinas síncronas pode ser conhecido a partir das equações que descrevem o síncrono trifásico de pólos salientes. Em particular, essas equações são utilizadas para avaliar o desempenho de motores síncronos, híbridos, vapor, combustão ou síncronos acionados por turbinas eólicas geradores [4].

Quando ocorre um curto-circuito na máquina síncrona, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [6]. Com o curto-circuito, é possível analisar as correntes de estator por meio das equações de Park e, conseqüentemente, determinar os parâmetros da máquina e seu comportamento diante do distúrbio.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De modo a facilitar a análise de curto-circuito trifásico na máquina síncrona, utilizam-se os conceitos de Park, seu conjunto de equações, conceitos de constantes de tempo e reatâncias operacionais. Estes, portanto, serão os temas apresentados

na fundamentação teórica.

A. Equações de Park

Em 1929, Park desenvolveu a transformação de coordenadas dq0, onde as fases a, b e c, defasadas de 120°, giram em sincronismo numa velocidade em relação ao referencial d e q, que é composto de 2 enrolamentos teoricamente estacionários e em quadratura [6].

Em seu trabalho, Park adota impedâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo. Dessa forma, o rotor é tratado como um modelo de parâmetros distribuídos visto pelo estator [6]. Park utiliza como eixo de referência o rotor, eliminando assim as indutâncias variáveis no tempo das equações de tensão. As equações de Park são apresentadas em (1) a (14).

$$v_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^r \quad (2)$$

$$v_{0s} = -r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3)$$

$$v_{kq1}^{ir} = r_{kq1}' i_{kq1}^{ir} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq1}^{ir} \quad (4)$$

$$v_{kq2}^{ir} = r_{kq2}' i_{kq2}^{ir} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq2}^{ir} \quad (5)$$

$$v_{fd}^{ir} = r_{fd}' i_{fd}^{ir} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}^{ir} \quad (6)$$

$$v_{kd}^{ir} = r_{kd}' i_{kd}^{ir} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}^{ir} \quad (7)$$

$$\psi_{qs}^r = -X_{ls} i_{qs}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{ir} + i_{kq2}^{ir}) \quad (8)$$

$$\psi_{ds}^r = -X_{ls} i_{ds}^r + X_{mq} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{ir} + i_{kd}^{ir}) \quad (9)$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} i_{0s} \quad (10)$$

$$\psi_{kq1}^{ir} = X_{lkq1}' i_{kq1}^{ir} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{ir} + i_{kq2}^{ir}) \quad (11)$$

$$\psi_{kq2}^{ir} = X_{lkq2}' i_{kq2}^{ir} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{ir} + i_{kq2}^{ir}) \quad (12)$$

$$\psi_{fd}^{ir} = X_{lfd}' i_{fd}^{ir} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{ir} + i_{kd}^{ir}) \quad (13)$$

$$\psi_{kd}^{ir} = X_{lkd}' i_{kd}^{ir} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{ir} + i_{kd}^{ir}) \quad (14)$$

Nas equações (15) a (20), utilizam-se reatâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo [4], sendo que o operador p é a derivada no domínio da frequência e s , o operador de Laplace.

$$v_{qs}^r(s) = -r_s i_{qs}^r(s) + \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) \quad (15)$$

$$v_{ds}^r(s) = -r_s i_{ds}^r(s) - \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) \quad (16)$$

$$v_{0s}^r(s) = -r_s i_{0s}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{0s}^r(s) \quad (17)$$

$$\psi_{qs}^r(s) = X_q(s) i_{qs}^r(s) \quad (18)$$

$$\psi_{ds}^r(s) = X_d(s) i_{ds}^r(s) + G(s) v_{fd}^r \quad (19)$$

$$\psi_{0s}^r(s) = X_{ls} i_{0s} \quad (20)$$

As equações de Park desprezam as características magnéticas do material resultando em um circuito magnético linear, não considerando a saturação. Portanto, se houver saturação, não é possível fazer este tipo de análise com as equações de Park. Além disso, as equações eliminam a quantidade de enrolamentos amortecedores de rotor.

B. Reatâncias de Máquina Síncrona

Utilizando os circuitos de eixo direto e de quadratura, é possível encontrar as reatâncias da máquina síncrona. Através da metodologia empregada [4], considerando uma máquina com um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor no eixo d e dois enrolamentos amortecedores no eixo q , têm-se os circuitos representados nas Figuras de 1 e 3.

Na Figura 1, ilustra-se em forma de circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(s)$. Na Figura 2, é exibido em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(s)$, com $f_d^r = 0$. Na Figura 3, tem-se a representação em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$, com $i_{ds}^r = 0$.

Na Figura 4, ilustra-se a máquina síncrona com eixos e enrolamentos, sendo, as três fases do estator as , bs e cs , os enrolamentos do rotor de campo f_d e amortecedor k_d no eixo direto e amortecedores k_{q1} e k_{q2} no eixo de quadratura.

Através das equações (15) e (16), é possível encontrar as expressões analíticas para $X_q(s)$, $X_d(s)$ e $G(s)$, apresentadas nas equações (21), (22) e (23). Nestas equações os valores das constantes de tempo τ_1 , τ_2 , etc. relacionam os componentes do seu respectivo circuito [4].

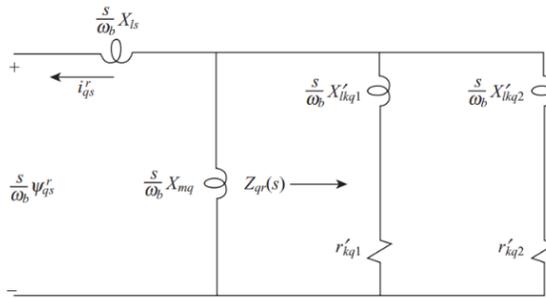


Figura 1: Circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(s)$.

Fonte: [4]

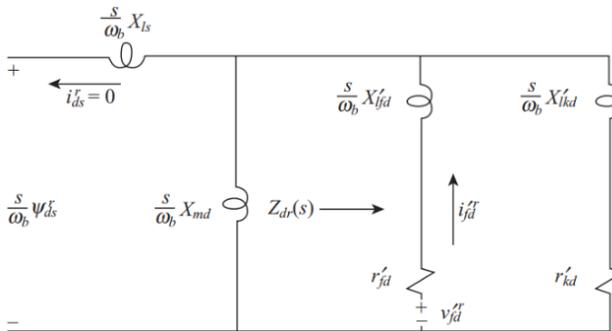


Figura 2: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(s)$.

Fonte [4]

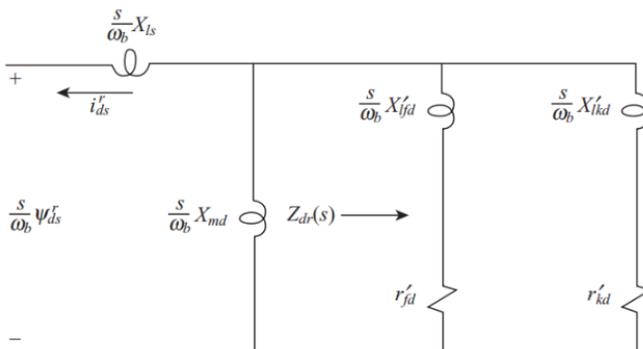


Figura 3: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$.

Fonte [4]

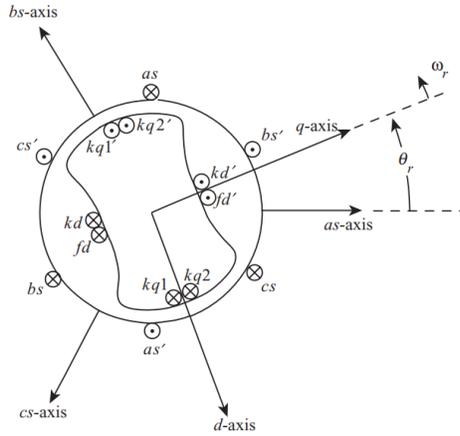


Figura 4: Esquema da máquina síncrona com os eixos e enrolamentos.

Fonte [4]

$$X_q(s) = X_q \frac{1 + (\tau_{q4} + \tau_{q5})s + \tau_{q4}\tau_{q6}s^2}{1 + (\tau_{q1} + \tau_{q2})s + \tau_{q1}\tau_{q3}s^2} \quad (21)$$

$$X_d(s) = X_d \frac{1 + (\tau_{d4} + \tau_{d5})s + \tau_{d4}\tau_{d6}s^2}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (22)$$

$$(s) = \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \frac{1 + \tau_{db}s}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (23)$$

As reatâncias são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, X_d'' e X_q'' , em altas frequências;
- Transitórias, X_d' e X_q' , em médias frequências; e
- Regime permanente, X_d e X_q , em baixas frequências.

Definem-se as reatâncias operacionais por um valor padrão para cada tipo de máquina, as quais se tratam de uma simplificação das formas derivadas do circuito da máquina e estimativa do valor real, sendo este preciso ou não.

C. Constantes de Tempo

As constantes de tempo da máquina síncrona possuem forma derivada das equações de Park e forma padrão. A forma padrão é uma simplificação da forma derivada, sendo uma estimativa do valor real.

Assim como as reatâncias, as constantes de tempo também têm sua classificação. As constantes de tempo são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, com τ_{d0}'' , τ_{q0}'' , τ_d'' e τ_q'' , e
- Transitórias, com τ_{d0}' , τ_{q0}' , τ_d' e τ_q' .

Obtêm-se as constantes de tempo a partir das equações de cálculo das impedâncias operacionais, (II.21), (II.22) e (II.23). O denominador destas equações representa a resposta natural do circuito, ou seja, a máquina operando em circuito aberto. Portanto, as constantes de tempo de circuito aberto, τ''_{d0} , τ''_{q0} , τ'_{d0} e τ'_{q0} , são as raízes da equação de segundo grau do denominador da respectiva reatância operacional.

As constantes de tempo de curto-circuito, τ''_d , τ''_{q0} , τ'_d e τ'_q também são calculadas a partir de (II.21), (II.22) e (II.23), sendo as raízes do numerador destas equações e representam a resposta forçada do sistema, que neste caso é um curto-circuito trifásico das fases do estator.

Encontra-se em [4], as equações das constantes de tempo aqui citadas. Em (24) a (31), tem-se as equações.

$$\tau'_{q0} = \frac{1}{w_b r'_{kq1}} (X'_{lkq1} + X_{mq}) \quad (24)$$

$$\tau'_{d0} = \frac{1}{w_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (25)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{w_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X'_{lkq1}}{X_{mq} + X'_{lkq1}} \right) \quad (26)$$

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X_{md} + X'_{lfd}} \right) \quad (27)$$

$$\tau'_q = \frac{1}{w_b r'_{kq1}} \left(X'_{lkq1} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (28)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{w_b r'_{fd}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (29)$$

$$\tau''_q = \frac{1}{w_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lkq1}}{X_{mq} X_{ls} + X_{mq} X'_{lkq1} + X_{ls} X'_{lkq1}} \right) \quad (30)$$

$$\tau''_d = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{md} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (31)$$

Quando $r'_{kq2} \gg r'_{kq1}$ e $r'_{kd} \gg r'_{fd}$, as estimativas para os valores padrão das constantes de tempo são mais próximas dos valores calculados a partir das reatâncias operacionais. Geralmente r'_{kd} é bem maior que r'_{fd} , gerando boas estimativas com os valores padrão para o eixo d . Mas r'_{kq2} é quase sempre menor que r'_{kq1} , o que torna as estimativas dos valores padrão não tão adequadas para o eixo q . Nas formas padrão, os termos com r'_{kq1} e com r'_{fd} são eliminados, conforme [4].

3 I CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO

Curto-circuito trifásico é o tipo de falta mais severa, ocasionando em uma corrente de falta elevada. É raro acontecer curto-circuito trifásico numa situação real com a máquina sem carga. Entretanto, para fins de estudos, considera-se um ensaio de curto-circuito trifásico sem carga. Através do ensaio é possível obter parâmetros de eixo d da máquina síncrona. Este ensaio é feito com a máquina já na velocidade síncrona, sem carga e com tensão de campo fixa. Em um determinado instante aplica-se um curto-circuito trifásico nas fases do estator da máquina [3].

A. Definição e Expressão Analítica

Para a análise do ensaio de curto-circuito trifásico da máquina síncrona sem carga, utiliza-se as equações de Park. Considerando $G(s = \infty)$ zero, pois o rotor é insensível à altas frequências (intervalo transitório), a variação da tensão de campo é nula e que os termos que aparecerão com r_s^2 serão muito pequenos, estes são desprezados. As equações das correntes de eixo q e d são apresentadas em (32), (33), e (34).

$$i_{qs}^r(s) = -\frac{1/X_q(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r_s v_{qs}^r(s)}{X_d(s)} + \omega_b s v_{qs}^r(s) - \omega_b^2 v_{ds}^r(s) \right] \quad (32)$$

$$i_{ds}^r(s) = -\frac{1/X_d(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r_s v_{ds}^r(s)}{X_q(s)} + \omega_b s v_{ds}^r(s) - \omega_b^2 v_{qs}^r(s) \right] \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{\omega_b r_s}{2} \left(\frac{1}{X_q(s)} + \frac{1}{X_d(s)} \right) \quad (34)$$

Para encontrar a corrente de curto-circuito é necessário manipular e resolver as equações (32), (33), e (34) no domínio do tempo. A corrente de curto-circuito é apresentada em (35), após seguir os passos de resolução de [4]. Os passos para esta resolução são:

- Tensão de eixo direto na falta como um degrau de $V_s \sqrt{2}$ para zero, sendo V_s o módulo da tensão nominal;
- $X_d(s)$ e $X_q(s)$ como função das constantes de tempo de circuito aberto e de curto-circuito;
- Fator alfa calculado com $X_s(s = \infty)$; e
- $X_q(s = \infty)$ e os termos com r_s (com exceção de alfa) são eliminados.

Na equação da corrente do estator (35), tem-se uma componente AC com a mesma frequência do sistema, uma componente DC que decresce de forma exponencial e outra componente AC que decresce de forma exponencial com o

dobro da frequência do sistema.

$$i_{as} = \sqrt{2}V_s \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau'_d} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau''_d} \right] \sin[\omega_b t + \theta_r(0)]$$

$$- \frac{\sqrt{2}V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X'_q} \right) e^{-\alpha t} \sin\theta_r(0) - \frac{\sqrt{2}V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_q} \right) e^{-\alpha t} \sin[2\omega_b t + \theta_r(0)]$$
(35)

B. Intervalos Subtransitório, Transitório e Regime Permanente no Curto-Circuito

Na ocorrência de curto-circuito na máquina síncrona, os fluxos concatenados nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Dessa forma, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [6].

Após o curto-circuito é possível notar variações na corrente da máquina síncrona. Na Figura 5, tem-se um exemplo do comportamento desta corrente, sendo dividida em três intervalos: subtransitório, transitório e regime permanente.

O intervalo subtransitório refere-se aos primeiros ciclos do curto-circuito contém correntes de armadura muito elevadas que se amortecem rapidamente, com relação às altas variações de corrente nos enrolamentos amortecedores.

No intervalo transitório a corrente amortecida vai a zero e a corrente de campo ainda é alta, porém menor que no intervalo subtransitório.

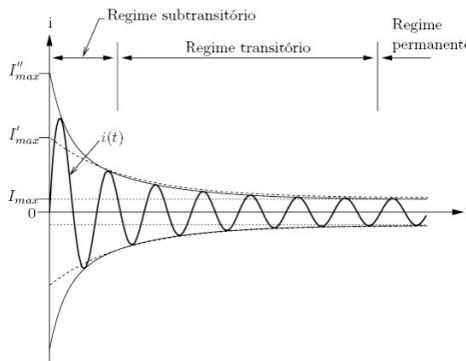


Figura 5: Exemplo de corrente em curto-circuito trifásico em uma máquina síncrona.

Fonte [1]

O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo. Neste intervalo não há corrente induzida, pois a máquina alcança o equilíbrio. Em regime permanente, o campo magnético resultante do estator gira na mesma velocidade que o campo induzido

pele rotor. Assim, não há variação temporal dos enlaces de fluxo nos circuitos do rotor e nenhuma tensão é induzida ali.

A reatância subtransitória é a menor de todas, seguida da reatância transitória e reatância em regime permanente, a maior delas. Dessa maneira, a relação entre as reatâncias de eixo direto é expressa da seguinte forma: $X_d'' < X_d' < X_d$.

4 | EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Em [2], [3] e [4], utiliza-se o método do oscilograma da corrente de curto-circuito para obtenção dos parâmetros de eixo d da máquina síncrona, através do ensaio de curto-circuito. Para facilitar, utiliza-se a escala logarítmica, a qual transforma as envoltórias em retas, e portanto, a forma logarítmica é mais prática para extração dos parâmetros, como mostra a Figura 6. O gráfico ilustra os componentes transitórios e subtransitório da corrente de curto-circuito do estator. Nesse oscilograma logarítmico não é plotada a corrente de regime permanente, logo não decai com o tempo.

Com a equação (36) é possível encontrar X_d a partir da corrente final, sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ o valor da corrente após alguns segundos, já estabilizando. A corrente final é dividida em três partes, conforme a expressão (37). Logo, em regime permanente tem-se i_{ss} (*steady-state*, regime permanente), como parte que decai com τ_d' tem-se i_t (corrente transitória) e como parte que decai com τ_d'' tem-se i_{st} (corrente subtransitória).

A Figura 6 é a plotagem logarítmica de $i_t + i_{st}$ (Intervalo transitório e subtransitório), por meio do qual é possível extrair o valor da corrente nos instantes iniciais da falta, $i_i(t = 0^+)$. Assim, calcula-se a razão entre as constantes de tempo de curto-circuito e circuito aberto, apresentada pela equação (38).

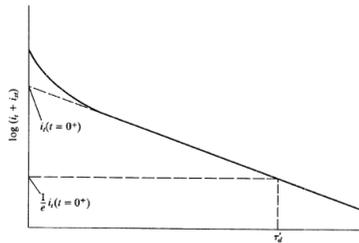


Figura 6: Curva logarítmica da forma de onda da corrente.

Fonte [4]

$$i_{sc}(t \rightarrow \infty) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X_d} \quad (36)$$

$$i_{sc} = i_{ss} + i_t + i_{st} \quad (37)$$

$$i_t(t = 0^+) = \sqrt{2}V_s \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (38)$$

Pode-se substituir $(\tau'_{do}/\tau'_d) \cdot (1/X'_d)$ por $1/X'_d$. Mesmo sem as constantes de tempo padrão, τ'_{do} pode ser calculado com parâmetros conhecidos da máquina [4]. As referências [2] e [3] assumem as constantes padrão para este cálculo.

Além disso, encontra-se a constante de tempo, sendo o tempo em que a corrente se torna $i_t(t = 0^+)/e$. Subtraindo o valor máximo de $i_t + i_{st}$ por $i_t(t = 0^+)$, obtém-se $i_{st}(t = 0^+)$. Com este resultado é possível traçar a curva da diferença e encontrar τ''_d da mesma forma que foi encontrado τ'_d . Pela equação (39), encontra-se X''_d .

$$i_{sc}(t = 0^+) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X''_d} \quad (39)$$

Com os equacionamentos, determina-se os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: τ'_d e τ''_d . Com esses parâmetros encontrados através do ensaio de curto-circuito, é possível obter os parâmetros da máquina síncrona. A aproximação para constantes de tempo padrão, para encontrar X'_d por exemplo, é realizada para simplificar os cálculos.

5 | ESTUDO DE CASO

Para aplicar os conceitos apresentados, elaborou-se um exemplo da extração de parâmetros de eixos d . Com os parâmetros reais da máquina, plotou-se gráficos da corrente de curto-circuito do estator. A partir dos gráficos, extraiu-se os parâmetros da máquina e estes foram comparados com os valores reais. Esse método permite verificar a aplicabilidade as equações de Park no ensaio de curto-circuito. Utilizou-se máquinas de 100 MVA e com tensão de 23 kV [6].

As Figuras 7, 8 e 9, ilustram o transitório dessas máquinas, plotados pelas equações de Park solucionadas no programa.

Na figura 7, tem-se o gráfico da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona, gerando uma corrente muito maior que a corrente nominal. Isso mostra a importância de uma proteção eficaz na máquina.

No gráfico da Figura 8, tem-se o oscilograma da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona sem a componente contínua e sem a componente com dobro da frequência. Nota-se que a corrente tende a se estabilizar mais rápido neste caso.

Com a equação (36) é possível calcular X_d , sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ igual a 1,458 p.u., de acordo com a figura 8. Através da equação (39), é possível encontrar

X_d'' , sendo $i_{sc}(t = 0^+)$ igual a 7,071 p.u. Utilizando-as, encontra-se $X_d = 1$ p.u. e $X_d'' = 0.2$ p.u., seguindo a referência [5]. Ambas as reatâncias encontradas são iguais às reatâncias reais da máquina. Para encontrar os demais parâmetros é preciso traçar a curva logarítmica e remover a parte de regime permanente.

A constante de tempo então pode ser calculada utilizando o ponto $i_t(t = 0^+)$ /e, conforme Figura 6. Através deste valor, utilizando o gráfico da Figura 10, é possível encontrar τ_d' . Encontra-se que τ_d' é igual a 1 s. Com os valores da corrente transitória e subtransitória, é possível encontrar o valor de corrente subtransitória no instante zero, sendo que $i_t(t = 0^+)$ já é um valor conhecido. Com a mesma lógica para encontrar a constante de tempo transitória, encontra-se τ_d'' , sendo igual a 0.03 s. Ambos os valores são iguais aos valores reais da máquina.

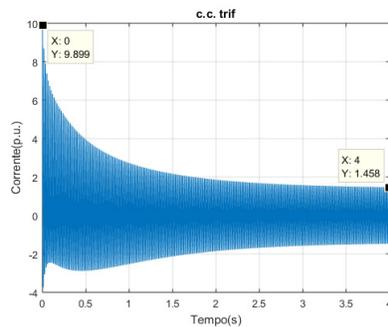


Figura 7: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, a vazio.

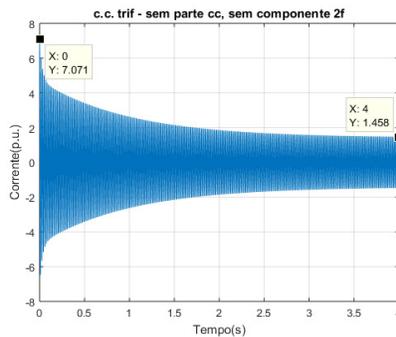


Figura 8: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua e sem componente com dobro da frequência.

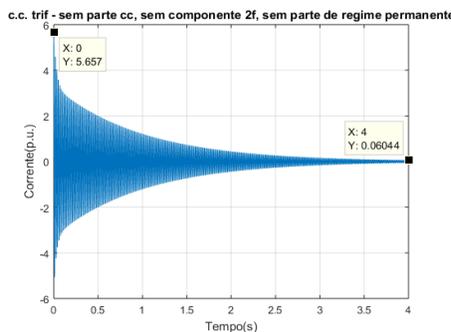


Figura 9: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua, sem componente com dobro da frequência e sem componente de regime permanente.

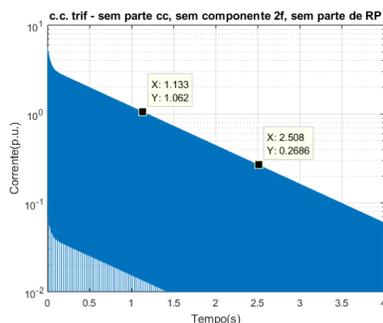


Figura 10: Gráfico em escala logarítmica

6 | CONCLUSÕES

Este trabalho exibiu a importância do ensaio de curto-circuito – que mostra o comportamento da máquina com mudanças bruscas de carga – para determinar os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: reatâncias operacionais e constantes de tempo.

Nota-se que o modelo computacional desenvolvido a partir das equações de Park, permite encontrar os parâmetros da máquina síncrona (constantes de tempo e reatâncias) de maneira precisa para o esforço computacional gasto, que é bastante pequeno, com exceção da reatância de eixo direto transitória.

Nota-se nos resultados a importância de proteção no equipamento, para que este possa funcionar de maneira contínua e oferecendo o melhor desempenho, a fim de evitar danos a máquina síncrona na ocorrência de curto-circuito nos terminais do estator.

Sugere-se como futuros trabalhos, a melhoria na extração de parâmetros, com uso de inteligência artificial para extrair os parâmetros de maneira mais eficiente e a simulação do comportamento das equações de Park com saturação

para verificar sua inadequabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, **Máquinas Elétricas**, 6ª edição, Bookman.
- [2] L. T. Jordão. **Máquinas síncronas**. LTC/EDUSP. São Paulo, 1980.
- [3] L. W. Matsch, J. D. Morgan. **Electromagnetic and electromagnetical machines**. 3rd Edition, Wiley. New York, 1987.
- [4] P. C. Krause. **Analysis of electric machinery and drive systems**. Wiley, IEEE.
- [5] R. H. Park., **Two reaction theory of synchronous machines – Generalized method of analysis - part I**. AIEE – Transactions, Vol. 48, Julho de 1929, pp. 716-727.
- [6] T. Granato, “**Análise de curto circuito em um gerador síncrono de pólos salientes pelo método dos elementos finitos**” UFRJ, Agosto 2013.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Ação socioambiental 27

Alternative Transient Program (ATP) 88

Armazenamento de energia elétrica 129, 131, 138, 143, 144

Atenção básica de saúde 193, 201, 203

B

BPMN 193, 194, 195, 197, 198, 204, 205

C

Cálculo estrutural 16

Chuva 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

Compensações sociais 27

Custo operacional 66, 76

D

Descargas disruptivas 3

Desempenho dielétrico 1, 2, 13

Distribuição de energia 144

E

Eficiência energética 53, 54, 55, 56, 61, 62, 64, 66, 67, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 117, 127, 137, 144

Eletrobras 28, 33, 38, 39, 40, 58, 64, 65, 79, 86, 163

Eletronorte 27, 28, 31, 33, 38, 39, 40

Energia solar 66, 67, 68, 73, 76, 114, 115, 116, 127, 128, 136, 139, 141, 145

Energia solar fotovoltaica 66, 76, 127, 128, 136, 139, 141

Envoltórias 146, 148, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 183

Extração de parâmetros 174, 183, 184, 186

F

Filtro morfológico 146, 151, 152, 154, 157, 159

Funções de transferência 88, 89

G

Geração de energia 61, 63, 66, 67, 68, 71, 76, 84, 87, 129, 130, 139, 140, 141

Gerador síncrono 146, 149, 150, 153, 159, 187

H

Harmônicos 160, 161, 163, 164, 165, 167, 171, 172

HarmZs 89, 90, 98, 160, 161, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 172

Hidrogênio 129, 131, 132, 138, 139, 141, 142, 143, 144

I

Iluminação pública 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

Isoladores 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17

M

Máquina síncrona 147, 148, 149, 152, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 184, 185, 186

Modelagem de processos 193, 197

Modelo de acompanhamento 88, 93

Modelos racionais 88, 89, 90

O

Operador nacional do sistema elétrico 41, 133, 143, 161

P

Painéis fotovoltaicos 66, 69, 76, 84, 131, 136, 137, 142

Painéis solares flutuantes 129, 130

Perda de excitação 146, 147, 148, 152, 153, 154, 157, 158, 159

Plano de corte manual de carga 41, 42, 46, 48, 51

Potência ativa 47, 146, 148

Procedimentos de redes 160

Procel Reluz 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

Programa brasileiro de etiquetagem 56, 77, 78, 82, 86, 87

Q

Qualidade da energia 100, 103

R

Reatância 174, 175, 177, 178, 180, 183, 186

S

Sistema interligado nacional 15, 41, 119, 138, 161, 162, 171

U

UHE Tucuruí 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 38, 39, 40

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4