

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 lights. 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
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 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^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. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. 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

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. Adailson 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/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
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. 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

REPRESENTAÇÃO DE MODELOS RACIONAIS NO PROGRAMA ATP

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 08/07/2020

Sergio Luis Varricchio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –
CEPEL
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/5825024551486331>

Trabalho originalmente publicado no XXIV SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, promovido pelo Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRE-Brasil).

RESUMO: A utilização de modelos racionais (MRs), isto é, modelos baseados nos polos dominantes e resíduos associados de funções de transferência (FTs), calculados de forma exata ou aproximada, têm sido amplamente utilizados em diversas áreas da engenharia, como modelagem de linhas de transmissão, de transformadores de potência, construção de equivalentes eletromagnéticos, etc. Atualmente, existem diversos métodos para a obtenção destes MRs, sendo o método denominado Vector Fitting o mais utilizado. No entanto, existem poucos trabalhos descrevendo como construir equivalentes eletromagnéticos, a partir destes MRs, em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, em especial, o ATP (Alternative Transient Program). Neste trabalho é dada uma contribuição a este tema, pela proposição de um

método para a implementação de MRs de FTs SISO (single-input single-output) no ATP.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos racionais, modelo de acompanhamento, Alternative Transient Program (ATP), funções de transferência, polos e resíduos.

REPRESENTATION OF RATIONAL MODELS IN THE ATP PROGRAM

ABSTRACT: The use of rational models (RMs), that is, models based on the dominant poles and associated residues of transfer functions (TFs), calculated in an exact or approximate way, has been widely used in several areas of engineering, such as modeling of transmission lines, power transformers, construction of electromagnetic equivalents, etc. Currently, there are several methods for obtaining these RMs, being the so-called Vector Fitting method the most used. However, there are few studies describing how to build electromagnetic equivalents, from these RMs, in electromagnetic transient simulation programs, particularly, the ATP (Alternative Transient Program). In this work, a contribution on this theme is given, by proposing a method for the implementation of RMs of TFs SISO (single-input single-output) in ATP.

KEYWORDS: Rational models, companion network, Alternative Transient Program (ATP), transfer functions, poles and residues.

1 | INTRODUÇÃO

Estudos de transitórios eletromagnéticos em redes elétricas são, em geral, concentrados

em uma área específica (área de estudos ou de interesse), onde se deseja analisar algum tipo de fenômeno elétrico. Desta forma, torna-se conveniente dividir a rede elétrica em dois subsistemas. O primeiro subsistema é formado pela área de interesse, que deve ser modelada em detalhes, o segundo é composto pelo resto do sistema (área externa) que pode ser representado por um equivalente. O principal motivo de se utilizar equivalentes é a redução do esforço computacional, do esforço despendido pelo analista em preparar os dados de toda a rede com detalhes e, conseqüentemente, do tempo necessário para a obtenção dos resultados. De fato, dependendo do porte do sistema a ser analisado, a utilização de equivalentes é a única forma viável de se realizar o estudo.

O equivalente comumente utilizado para a área externa é uma matriz de impedâncias nodais, cujas componentes são as impedâncias próprias e de transferência de curto-circuito obtidas a partir de suas barras de fronteira para a frequência fundamental do sistema. Por este método, as características da área externa para outras frequências são perdidas, o que poderá implicar em sérios erros em análises posteriores.

Portanto, a utilização de equivalentes de alta fidelidade (qualidade) de redes elétricas é de fundamental importância para que estes estudos possam ser feitos de forma precisa e confiável. Modelos racionais (MRs), isto é, modelos baseados nos polos dominantes e resíduos associados de funções de transferência (FTs), calculados de forma exata [1] ou aproximada [2], [3], têm sido amplamente utilizados para esta e outras importantes finalidades [4]. Atualmente, existem diversos métodos para a obtenção destes MRs, sendo o método denominado Ajuste Vetorial ou, em inglês, Vector Fitting (VF), o mais utilizado. Neste método, as respostas em frequência das admitâncias ou impedâncias próprias das barras de fronteira e de transferência entre elas são eficientemente aproximadas por funções racionais de baixa ordem da frequência complexa s . O problema passa a ser, então, como representar estas funções racionais de s (modelos racionais) em programas de simulação no tempo de transitórios eletromagnéticos como EMTP, PSCAD e ATP.

Neste trabalho é proposto um método simples e eficiente para a representação destes MRs no programa ATP (Alternative Transient Program), utilizando a linguagem MODELS, disponibilizada neste programa para que os usuários possam definir seus próprios modelos de componentes de redes elétricas.

Na presente fase da pesquisa, este método é aplicável apenas a equivalentes mono-barras, ou seja, quando as áreas de interesse e externa são conectadas apenas por uma barra (FTs SISO). Julga-se, no entanto, que este método pode ser futuramente generalizado para ser aplicado, também, a equivalentes de redes multi-barras (FTs multi-input multi-output - MIMO). Após esta generalização, pretende-se implementar este método no programa HarmZs do CEPEL (para estudo

do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas). Desta forma, as aplicações do programa HarmZs serão expandidas, tornando-o, também, uma ferramenta complementar importante para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência de grande porte.

Além do desenvolvimento matemático detalhado do método proposto, neste trabalho será apresentado também um caso exemplo mostrando a eficiência do método por meio de comparações entre respostas no tempo dos modelos completo da rede elétrica e da área de interesse conectada ao MR da área externa.

2 | MODELOS RACIONAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

A relação entre uma saída $y(s)$ e \mathbb{C} e uma entrada $u(s)$ é definida pela FT apropriada $H(s)$ e \mathbb{C} , ou seja

$$y(s) = H(s)u(s) \equiv \left[\sum_l \frac{R_l}{s - \lambda_l} + \sum_k \left(\frac{R_k}{s - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} \right) + es + d \right] u(s) \quad (2.1)$$

onde l pertence ao conjunto de índices dos polos dominantes reais λ_l e de seus resíduos associados R_l . Por outro lado, k pertence ao conjunto dos índices dos pares de polos dominantes complexos conjugados λ_k, λ_k^* e de seus resíduos associados R_k, R_k^* . Note, portanto, que $l \neq k$. Os símbolos e e d denotam números reais.

Os estados podem ser definidos por:

$$x_l(s) = \frac{R_l}{s - \lambda_l} u(s) \quad (2.2)$$

$$x_k(s) = \left(\frac{R_k}{s - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} \right) u(s) \quad (2.3)$$

sendo x_l um estado correspondente a um polo e resíduo associados reais e x_k um estado correspondente a um par de polos e resíduos associados complexos conjugados.

Seja y_{ed} a contribuição para a saída dos termos e e d , ou seja:

$$y_{ed}(s) = (es + d)u(s) \quad (2.4)$$

Substituindo (2.2), (2.3) e (2.4) em (2.1), obtém-se:

$$y(s) = \sum_l x_l(s) + \sum_k x_k(s) + y_{ed}(s) \quad (2.5)$$

De (2.2), tem-se:

$$\dot{x}_l(t) - x_l(t)\lambda_l = R_l u(t) \quad (2.6)$$

Integrando (2.6) de t a $t + \Delta t$ pelo método trapezoidal, chega-se a:

$$x_l(t + \Delta t) - x_l(t) - \frac{\lambda_l \Delta t}{2} [x_l(t + \Delta t) + x_l(t)] = \frac{R_l \Delta t}{2} [u(t + \Delta t) + u(t)] \quad (2.7)$$

Atribuindo os sobrescritos 0 e 1 aos instantes de tempo t e $t + \Delta t$, respectivamente, (2.7) pode ser escrita mais simplificadamente como:

$$x_l^1 - x_l^0 - \frac{\lambda_l \Delta t}{2} (x_l^1 + x_l^0) = \frac{R_l \Delta t}{2} (u^1 + u^0) \quad (2.8)$$

Resolvendo (2.8) para x_l^1 , obtém-se:

$$x_l^1 = \left(\frac{\xi + \lambda_l}{\xi - \lambda_l} \right) x_l^0 + \left(\frac{R_l}{\xi - \lambda_l} \right) (u^1 + u^0) \quad (2.9)$$

sendo:

$$\xi = \frac{2}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Seja

$$A_l = \frac{\xi + \lambda_l}{\xi - \lambda_l} \quad (2.11)$$

e

$$B_l = \frac{R_l}{\xi - \lambda_l} \quad (2.12)$$

Substituindo (2.11) e (2.12) em (2.9), obtém-se:

$$x_l^1 = B_l u^1 + A_l x_l^0 + B_l u^0 \quad (2.13)$$

O estado x_k pode ser escrito como

$$x_k = \bar{x}_k + \bar{\bar{x}}_k \quad (2.14)$$

sendo:

$$\bar{x}_k(s) = \frac{R_k}{s - \lambda_k} u(s) \quad (2.15)$$

$$\bar{\bar{x}}_k(s) = \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} u(s) \quad (2.16)$$

Seja

$$h_k(s) = \frac{R_k}{s - \lambda_k} \quad (2.17)$$

A resposta no tempo de h_k (igual a resposta de \bar{x}_k ao impulso) é dada por:

$$h_k(t) = R_k e^{\lambda_k t} \quad (2.18)$$

Logo, pelo Teorema da Convolução, a resposta no tempo de \bar{x}_k a uma entrada qualquer u é dada por:

$$\bar{x}_k(t) = \int_0^t h_k(\tau) u(t-\tau) d\tau = \int_0^t R_k e^{\lambda_k \tau} u(t-\tau) d\tau \quad \therefore$$

$$\bar{x}_k(t) = \int_0^t e^{\sigma_k \tau} \left[(R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) + j (R_{\text{Im}_k} \cos \omega_k \tau + R_{\text{Re}_k} \sin \omega_k \tau) \right] u(t-\tau) d\tau \quad (2.19)$$

sendo:

$$\lambda_k = \sigma_k + j \omega_k \quad (2.20)$$

$$R_k = R_{\text{Re}_k} + j R_{\text{Im}_k} \quad (2.21)$$

Realizando procedimento análogo, obtém-se:

$$\bar{\bar{x}}_k(t) = \int_0^t e^{\sigma_k \tau} \left[(R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) - j (R_{\text{Im}_k} \cos \omega_k \tau + R_{\text{Re}_k} \sin \omega_k \tau) \right] u(t-\tau) d\tau \quad (2.22)$$

Portanto, de acordo com (2.14), (2.19) e (2.22), a contribuição de x_k será:

$$x_k(t) = 2 \int_0^t e^{\sigma_k \tau} (R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) u(t-\tau) d\tau = 2\Re[\bar{x}_k(t)] \quad (2.23)$$

A Equação (2.23) mostra que não é necessário aplicar o método de integração trapezoidal a ambas as parcelas de (2.14), dadas por (2.15) e (2.16). Basta aplicar a (2.15) e multiplicar a parte real do resultado por 2.

De (2.15), tem-se:

$$\dot{\bar{x}}_k(t) - \bar{x}_k(t) \lambda_k = R_k u(t) \quad (2.24)$$

De forma análoga à (2.6), a integração trapezoidal de (2.24) produz:

$$\bar{x}_k^1 = \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) \bar{x}_k^0 + \left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k} \right) (u^1 + u^0) \quad (2.25)$$

Tem-se que:

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{\text{Re}_k} + j \bar{x}_{\text{Im}_k} \quad (2.26)$$

Substituindo (2.26) em (2.25), obtém-se:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) (\bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^0) + \left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k} \right) (u^1 + u^0) \quad (2.27)$$

Seja:

$$C_k + j D_k = \frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \quad (2.28)$$

$$E_k + j F_k = \frac{R_k}{\xi - \lambda_k} \quad (2.29)$$

Substituindo (2.28) e (2.29) em (2.27), obtém-se:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = (E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0) + j (F_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + D_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + F_k u^0) \quad (2.30)$$

Tem-se de (2.30) que:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 = E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0 \quad (2.31)$$

$$\bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = F_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + D_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + F_k u^0 \quad (2.32)$$

De acordo com (2.23) e (2.31), obtém-se:

$$x_k^1 = 2 \bar{x}_{\text{Re}_k}^1 = 2 \left(E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0 \right) \quad (2.33)$$

De (2.4), tem-se:

$$y_{ed}(t) = eu(t) + du(t) \quad (2.34)$$

Integrando (2.34) de t a $t + \Delta t$ pelo método trapezoidal, chega-se a:

$$y_{ed}(t + \Delta t) = (d + \xi e)u(t + \Delta t) + (d - \xi e)u(t) - y_{ed}(t) \quad (2.35)$$

Novamente, atribuindo os sobrescritos 0 e 1 aos instantes de tempo t e $t + \Delta t$, respectivamente, (2.35) pode ser escrita mais simplificada como:

$$y_{ed}^1 = (d + \xi e)u^1 + (d - \xi e)u^0 - y_{ed}^0 \quad (2.36)$$

De (2.5), tem-se:

$$y^1 = \sum_l x_l^1 + \sum_k x_k^1 + y_{ed}^1 \quad (2.37)$$

Substituindo (2.13), (2.33) e (2.36) em (2.37), obtém-se:

$$y^1 = \left(\sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d + \xi e \right) u^1 + \left(\sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d - \xi e \right) u^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.38)$$

Definindo

$$\Psi = \sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d \quad (2.39)$$

a Equação (2.38) pode ser reescrita mais compactamente como:

$$y^1 = (\Psi + \xi e)u^1 + (\Psi - \xi e)u^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.40)$$

2.1 Entrada de Tensão e Saída de Corrente - MR de Admitância

No caso da entrada u ser igual a uma tensão v e a saída y igual a uma corrente \hat{I} , (2.40) pode ser reescrita como:

$$\hat{I}^1 = (\Psi + \xi e)v^1 + (\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.41)$$

A Equação (2.41) pode ser interpretada como o equivalente de Norton mostrado na Figura 2.1 (também conhecido como modelo de acompanhamento ou modelo companheiro [5]), onde a condutância g e a fonte de corrente I^0

(constituída apenas por termos históricos) são dadas por:

$$g = \Psi + \xi e \quad (2.42)$$

$$I^0 = - \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.43)$$

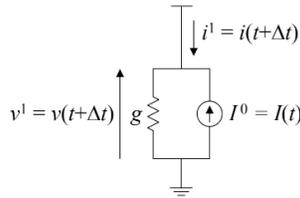


Figura 2.1 - Circuito equivalente de Norton

De acordo com a Figura 2.1, pode-se escrever:

$$i^1 = g v^1 - I^0 \Rightarrow i(t + \Delta t) = g v(t + \Delta t) - I(t) \quad (2.44)$$

2.2 Entrada de Corrente e Saída de Tensão - MR de Impedância

No caso da entrada u ser igual a uma corrente \hat{I} e a saída y igual a uma tensão v , (2.40) pode ser reescrita como:

$$i^1 = \frac{v^1}{\Psi + \xi e} - \frac{1}{\Psi + \xi e} \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.45)$$

A Equação (2.45) também pode ser interpretada como o equivalente de Norton mostrado na Figura 2.1, mas, neste caso, a condutância g e a fonte de corrente I^0 (constituída apenas por termos históricos) são dadas por:

$$g = \frac{1}{\Psi + \xi e} \quad (2.46)$$

$$I^0 = g \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.47)$$

2.3 Equações complementares

Substituindo (2.20) em (2.28), obtém-se:

$$C_k = \Re \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) = \frac{\xi^2 - (\sigma_k^2 + \omega_k^2)}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.48)$$

$$D_k = \Im \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) = \frac{2\omega_k \xi}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.49)$$

Substituindo (2.20) e (2.21) em (2.29), obtém-se:

$$E_k = \Re\left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k}\right) = \frac{R_{\text{Re}_k}(\xi - \sigma_k) - R_{\text{Im}_k} \omega_k}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.50)$$

$$F_k = \Im\left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k}\right) = \frac{R_{\text{Re}_k} \omega_k + R_{\text{Im}_k}(\xi - \sigma_k)}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.51)$$

3 I RESULTADOS

Para testar a implementação do equivalente de Norton, mostrado na Figura 2.1, no ATP por meio da ferramenta MODELS, utilizou-se o sistema teste simples de cinco barras mostrado na Figura 3.1 (a). Este sistema é uma ampliação do sistema de três barras apresentado em [6], feita pela conexão dos sistemas mostrados na Figura 3.1 (b) e Figura 3.1 (c). Os valores dos componentes do sistema mostrado na Figura 3.1 (b) são iguais aos de seus correspondentes mostrados na Figura 3.1 (c) que, por sua vez, são iguais aos valores originais do sistema de três barras.

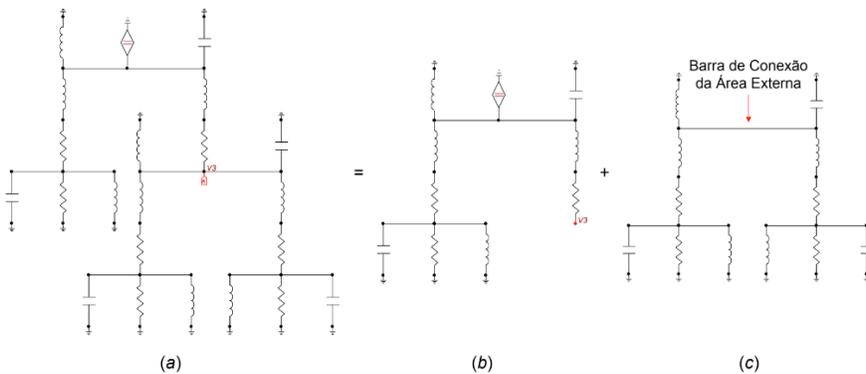


Figura 3.1 - Sistema teste de cinco barras

Nesta implementação, o sistema mostrado na Figura 3.1 (b) será mantido íntegro (área de estudos) e o mostrado na Figura 3.1 (c) será substituído pelo equivalente de Norton (área externa).

Os polos e resíduos associados da admitância própria da barra de conexão da área externa isolada (MR de admitância da área externa) estão mostrados na Tabela 3.1, sendo os valores dos termos e e d iguais a 2.39×10^{-5} e 0 , respectivamente. Por outro lado, os polos e resíduos associados da impedância própria da barra de conexão da área externa isolada (MR de impedância da área externa) estão apresentados na Tabela 3.2, sendo os valores dos termos e e d nulos.

Uma vez que a área externa possui apenas componentes de parâmetros concentrados, a mesma foi facilmente modelada por sistemas descritores [6]. Esta

formulação permite a utilização do método QZ [7] para o cálculo exato (dentro da precisão da aritmética finita) dos polos e resíduos. Deve-se observar que se a área externa possuir componentes de parâmetros distribuídos (i.e., linhas de transmissão - LTs), que é a situação de maior interesse prático, o método QZ não é aplicável. Neste caso, os métodos descritos em [1], [2] ou [3] poderiam ser utilizados. Deve-se observar que a aplicação do VF [2] às respostas em frequência da admitância e impedância próprias da barra de conexão de área externa produziu valores muito próximos aos apresentados na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente.

Na Figura 3.2 está mostrado o circuito da área de estudos conectada à área externa representada pela MODELS (type-94 Norton component). Ambos os equivalentes de Norton dos MRs de admitância e de impedância foram implementados nesta linguagem. As respostas de tensão na barra de conexão (indicada como V_3) do sistema modelado convencionalmente, mostrado na Figura 3.1 (a), e do sistema com a área externa modelada pelos equivalentes de Norton dos MRs de admitância e de impedância, mostrado na Figura 3.2, estão apresentadas na Figura 3.3, sendo as três curvas visualmente coincidentes. Estas respostas são devidas a um degrau de 1 A aplicado pela fonte de corrente mostrada nestas figuras.

Polos	Resíduos
$-804.434251993978 \pm j355061885351934$	$50.4068078617104 \mp j10.7321081794713$
$-338.520512682448 \pm j267092047917551$	$41.1030087390907 \mp j4.48279363010448$
0	124.9987129904 82
-1.0090834430 7371	1.8274893718 8682
-1.0548747621 3233	2.2806859071 9615

Tabela 3.1 - Polos e resíduos associados do MR de admitância da área externa

Polos	Resíduos
$-345.88480703949 \pm j4535.65834674007$	$116586394390407 \mp j3717.38798953217$
$-507.003088494858 \pm j3069.12931700367$	$1362.78139937112 \pm j2115.05556146725$
$-290.083330514519 \pm j1583.59473046325$	$7899.08138142322 \pm j 211831367036637$
-0.9891444291 01846	-0.0001903909 71331472
-1.0418910312 2054	$-6.5180336640 7657 \times 10^{-5}$

Tabela 3.2 - Polos e resíduos associados do MR de impedância da área externa

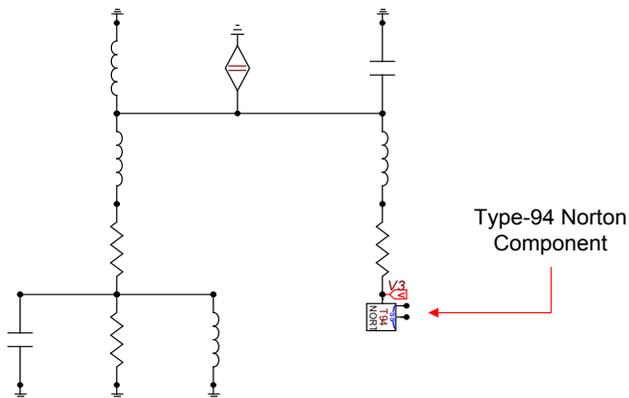


Figura 3.2 - Circuito da área de estudos conectada à área externa modelada pela MODELS (type-94 Norton component)

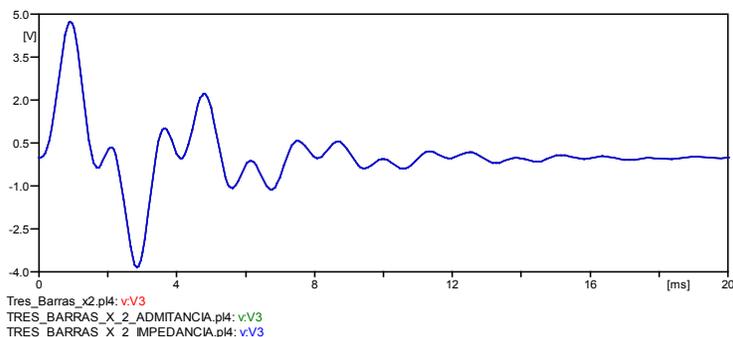


Figura 3.3 - Respostas do sistema de cinco barras modelado convencionalmente (curva vermelha) e com a área externa representada pelos equivalentes de Norton dos MRs de admitância (curva verde) e de impedância (curva azul)

Como o objetivo das simulações realizadas foi o de comprovar a precisão do método proposto, utilizaram-se todos os polos e resíduos associados dos MRs de admitância e impedância. No entanto, na prática, apenas os polos dominantes (polos associados a resíduos de elevado módulo) são utilizados (modelo reduzido). Para o caso exemplo utilizado, os polos reais -1.00908344307371 e -1.05487476213233 do MR de admitância e os polos -0.989144429101846 e -1.04189103122054 do MR de impedância poderiam ser desprezados sem prejuízos à precisão das simulações. Deve-se observar que sistemas contendo LTs modeladas por parâmetros distribuídos possuem um número infinito de polos (sistemas infinitos), mas apenas os polos mais dominantes necessitam ser utilizados [1] na construção dos MRs (MRs de ordem reduzida).

4 | CONCLUSÃO

Neste trabalho é proposto um método para a representação de MRs de admitância e de impedância no programa ATP. MRs são de fundamental importância para a construção de equivalentes de redes elétricas de alta fidelidade. Apesar desta importância, existem poucos trabalhos descrevendo como construir equivalentes eletromagnéticos, a partir dos MRs, em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos. Na referência [8] está o mais importante e completo destes trabalhos. Ao contrário do método proposto, o descrito em [8] utiliza uma formulação matricial, baseada na realização de estados do MR. Uma vez que a linguagem MODELS, disponibilizada no ATP, não lida diretamente com matrizes [9], o método proposto, além de mais simples, é mais adequado à sua utilização.

Atualmente, o método proposto é aplicável apenas a equivalentes mono-barras, ou seja, quando as áreas de interesse e externa são conectadas apenas por uma barra (FTs SISO). Julga-se, no entanto, que este método possa ser generalização para ser aplicado, também, a equivalentes de redes multi-barras (FTs MIMO). Após esta generalização, pretende-se implementar este método no programa HarmZs do CEPEL (para estudo do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas), tornando-o, também, uma ferramenta complementar importante para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência de grande porte.

REFERÊNCIAS

[1] Sergio Luis Varricchio, Francisco Damasceno Freitas, Nelson Martins, and Franklin Clement Véliz “Computation of Dominant Poles and Residue Matrices for Multivariable Transfer Functions of Infinite Power System Models”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 3, May 2015.

[2] Bjørn Gustavsen and Adam Semlyen, “Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, July 1999.

[3] Taku Noda, “Identification of a Multiphase Network Equivalent for Electromagnetic Transient Calculations Using Partitioned Frequency Response”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, April 2005.

[4] Stefano Grivet-Talocia and Bjørn Gustavsen, “Black-box Macromodeling and its EMC Applications”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – Volume 5 – Quarter 3, 2016.

[5] Alécio B. Fernandes e Antonio C. S. Lima, “Elaboração de Modelos Definidos pelo Usuário no ATP”, XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, de 23 a 26 de Outubro de 2011.

[6] S. L. Varricchio, N. Martins, and L. T. G. Lima, "A Newton-Raphson Method Based on Eigenvalue Sensitivities to Improve Harmonic Voltage Performance", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, January 2003, pp. 334-342.

[7] G. H. Golub and C. F. Van Loan, Matrix Computations, 3rd ed. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 1996.

[8] Bjørn Gustavsen and H. M. Jeewantha De Silva, "Inclusion of Rational Models in an Electromagnetic Transients Program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-Parameters, Transfer Functions", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, April 2013.

[9] H. K. Høidalen, A. H. Soloot: "Cable modelling in ATP – from NODA to TYPE94", Proc. EMTP Users Group meeting, Helsinki, Finland, Aug. 16-17, 2010.

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