


HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
JOÃO DALLAMUTA  
MARCELO HENRIQUE GRANZA  
(ORGANIZADORES)

# A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

**Atena**  
Editora  
Ano 2020



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
JOÃO DALLAMUTA  
MARCELO HENRIQUE GRANZA  
(ORGANIZADORES)

# A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA 2

**Atena**  
Editora  
Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Geraldo Alves

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



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

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

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

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

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

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

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
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  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
 Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
 Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
 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  
 Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
 Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
 Prof. Me. Douglas Santos Mezacas -Universidade Estadual de Goiás  
 Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
 Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
 Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
 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. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
 Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
 Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
 Profª Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
 Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
 Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
 Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá  
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

P964 A produção do conhecimento na engenharia elétrica 2 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta, Marcelo Henrique Granza. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

Formato: PDF  
 Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
 Modo de acesso: World Wide Web  
 Inclui bibliografia  
 ISBN 978-65-86002-65-2  
 DOI 10.22533/at.ed.652202303

1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João. III. Granza, Marcelo Henrique.  
 CDD 623.3

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

Atena Editora  
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

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

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

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

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
Marcelo Henrique Granza

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE TURBINAS EÓLICAS EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO MATLAB/SIMULINK NA APRENDIZAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE	
Marcos José dos Santos Junior Vlademir Ap. Freire Junior Marcelo Henrique Granza João Luiz Dallamuta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023031</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
RECONHECIMENTO DE DÍGITOS EM IMAGENS DE MEDIDORES DE ENERGIA NO CONTEXTO DE UM APLICATIVO DE AUTOLEITURA	
Arthur Costa Serra João Vitor Ferreira França Ricardo Costa da Silva Marques Wesley Kelson Ribeiro Figueredo Artur Bernardo Silva Reis Italo Francyles Santos da Silva Simara Vieira da Rocha Aristófanés Correa Silva Eliana Márcia Garros Monteiro Italo Fernandes Serra da Silva Marcia Izabel Alves da Silva José Messias dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023032</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
O CONCEITO DE CASA INTELIGENTE APLICADO A PAÍSES DESENVOLVIDOS E EMERGENTES: BENEFÍCIOS, BARREIRAS E GRAU DE ADESÃO	
Florença Moraes da Silva Rosana Aparecida Ferreira Nunes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023033</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO	
Igor Ferreira Visconti	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023034</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA	
Périson Pavei Uggioni André Roberto de Sousa Anderson Daleffe Diego Tiburcio Fabre	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023035</b>	

<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>58</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY E ALGORITMOS DE APRENDIZADO PARA SEQUÊNCIA DE PARTIDA DE PLANTAS INDUSTRIAIS	
André da Silva Barcelos Fábio Muniz Mazzone	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023036</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>72</b>
SIMULAÇÃO DE SINTONIZAÇÃO DE AUTOMÁTICA PARA UM CONTROLADOR PID EM UMA PLANTA NÃO-LINEAR USANDO ALGORITMO GENÉTICO	
Diogo Aparecido Cavalcante de Lima Hiago Araújo Silva Alexandre Carvalho Silva Maurício José Aureliano Júnior Alexandre Cardoso Edgard Afonso Lamounier Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023037</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>82</b>
CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO PARA UM ROBÔ PARALELO COM APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CONFECCIONISTA	
Asafe dos Santos Silva Acarcio Gomes de Almeida Júnior Alexander Patrick Chaves de Sena João Manoel Freitas Souza José Lucas Moreira Cavalcanti de Abreu	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023038</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>95</b>
DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA DE CONTROLE HÍBRIDA PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE ALTA PRESSÃO	
Murilo Ferreria Vitor Alexsandro dos Santos Silveira Guilherme Matias Rodolfo César Costa Flesch	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6522023039</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>110</b>
UMA NOVA ABORDAGEM DE UM SIMULADOR VIRTUAL DE IDENTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA BASEADO NA METODOLOGIA DE SISTEMAS INTELIGENTES INSERIDO NO CONTEXTO DE REDES NEURAIS	
Matheus Silva Pestana Orlando Donato Rocha Filho Danúbia Soares Pires	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230310</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>124</b>
INFLUÊNCIA DO ERRO DE QUANTIZAÇÃO APLICADO NO CONTROLE DIGITAL DE VELOCIDADE DE UM MÓDULO SERVOMECANISMO DIDÁTICO	
Vlademir Ap. Freire Junior Marcelo Henrique Granza	



João Luiz Dallamuta

**DOI 10.22533/at.ed.65220230311**

**CAPÍTULO 12 ..... 135**

**CRIAÇÃO DE UM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS EM UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Edilberto Pereira Teixeira

Luciano Rangel Pinheiro Neto

**DOI 10.22533/at.ed.65220230312**

**CAPÍTULO 13 ..... 147**

**ESTUDO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO**

Pablo Rodrigues Lopes

Rui Bertho Junior

**DOI 10.22533/at.ed.65220230313**

**CAPÍTULO 14 ..... 159**

**MODELAGEM INTELIGENTE NEBULOSA APLICADA À HIDROPONIA VIA SISTEMA EMBARCADO**

Kayon Vinicius Lima Lopes

Danúbia Soares Pires

Orlando Donato Rocha Filho

**DOI 10.22533/at.ed.65220230314**

**CAPÍTULO 15 ..... 172**

**MODELO DE NEURÔNIO MEMRISTIVO DE DIÓXIDO DE VANÁDIO COM CODIFICAÇÃO DE IMPULSOS PRBS-PWM**

Rennan Santos de Araujo

Luiz Alberto Luz de Almeida

Felipe Sadami Oiwa da Costa

**DOI 10.22533/at.ed.65220230315**

**CAPÍTULO 16 ..... 187**

**MODELO MISO NEBULOSO COM ESTRUTURA MAMDANI APLICADO À ANÁLISE E CONTROLE DE VAZÃO HÍDRICA**

Lorena Maria Figueiredo Albuquerque

Kayon Vinicius Lima Lopes

Orlando Donato Rocha Filho

Danúbia Soares Pires

**DOI 10.22533/at.ed.65220230316**

**CAPÍTULO 17 ..... 199**

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AVALIAÇÃO DE ENGENHARIA COGNITIVA EM *SERIOUS GAMES***

Mateus Gomes Binatti

Marcos Venícios Conceição de Araújo

Pollyana Coelho da Silva Notargiacomo

**DOI 10.22533/at.ed.65220230317**

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>209</b>
FILTRO DE KALMAN BASEADO EM MODELO FUZZY TAKAGI – SUGENO VIA ANÁLISE ESPECTRAL DE DADOS EXPERIMENTAIS	
Daiana Caroline dos Santos Gomes Ginalber Luiz de Oliveira Serra	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230318</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>224</b>
CONSTRUÇÃO, DESIGN DE CONTROLE E CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR BLUETOOTH DE UM ROBÔ AUTO EQUILIBRANTE	
Giulio Cesare Mastrocinque Santo Claudio Garcia	
<b>DOI 10.22533/at.ed.65220230319</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>240</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>241</b>

## MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Data de aceite: 17/03/2020

Data de submissão: 10/02/2019

**Igor Ferreira Visconti**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)  
Rio de Janeiro, RJ

<http://lattes.cnpq.br/1042158397912499>

**RESUMO:** Estudos de transitórios eletromecânicos analisam a capacidade de um dado sistema elétrico de potência atingir um novo ponto de equilíbrio após um distúrbio. Tradicionalmente, as cargas de um sistema de potência são os elementos de maior imprecisão, em função da sua composição de equipamentos consumidores de energia que são ligados ou desligados do sistema ao longo do dia, da semana e do ano. Para as concessionárias de transmissão, os sistemas de distribuição representam as cargas a serem atendidas. Entretanto, os detalhes da topologia dos sistemas de distribuição, onde alguns deles possuem geração distribuída, frequentemente não estão disponíveis ou não estão atualizados no banco de dados de empresas de transmissão. O objetivo deste trabalho é apresenta uma metodologia para obtenção de modelos de cargas baseados em medições, que estima equivalentes para simulações dinâmicas para a operação e o planejamento de um sistema

elétrico de potência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Algoritmo Genético, Modelagem de Carga, Estabilidade Transitória, Identificação de Sistemas.

**ABSTRACT:** Electromechanical transient studies analyze the ability of a given electrical power system to reach a new equilibrium point after a disturbance. Traditionally, power system loads are the most inaccurate elements, due to their composition of energy-consuming equipment that is switched on or off throughout the day, week and year. For transmission utilities, distribution systems represent the loads to be met. However, details of distribution system topology, where some of them have distributed generation, are often unavailable or not up to date in the transmission company database. The objective of this work is to present a measurement-based load modeling methodology for dynamic simulations that support operation and planning of electrical power systems.

**KEYWORDS:** Genetic Algorithm, Load Modeling, Transient Stability, System Identification.

### 1 | INTRODUÇÃO

A operação estável de um sistema elétrico de potência depende da sua capacidade

de combinar continuamente a geração com a demanda de modo eficiente, tanto tecnicamente quanto economicamente. As características de carga e a severidade de desvios de tensão e frequência de seus valores nominais impactam a dinâmica do sistema de potência, influenciando a estabilidade angular e de tensão, o amortecimento do sistema e as oscilações entre áreas (KUNDUR, 1994). Modelos de cargas muito otimistas são aqueles que em simulações dinâmicas de faltas num sistema elétrico de potência subestimam o real impacto da contingência no barramento de carga, podendo comprometer a segurança do sistema, já que os resultados de tal simulação apresentaria margens de estabilidade maiores do que as condições operativas reais impõem; por outro lado, modelos de cargas pessimistas superestimam o real impacto de um distúrbio no ponto de operação do barramento de carga, conseqüentemente levando a restrições conservadoras quanto à capacidade de transferência de energia em linhas de transmissão (IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE, 1993).

Apesar da importância das cargas na análise da estabilidade do sistema, ainda são utilizados modelos estáticos genéricos para a representação matemática das cargas em simulações dinâmicas, de acordo com o levantamento apresentado em (CIGRE WORKING GROUP C4.605, 2014). As atividades de planejamento e programação da operação, conduzidas pelo Operador Nacional do Sistema brasileiro (ONS), utilizam ferramentas computacionais para estudos elétricos da operação e do planejamento do sistema interligado nacional. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) provê grande parte das ferramentas computacionais utilizadas pelo ONS em análise de rede, sendo o ANATEM recomendado para a operação e planejamento de sistemas elétricos de potência (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS, 2002). O ANATEM, que realiza simulação de transitórios eletromecânicos para estudos de estabilidade, parte de um ponto de operação dado por outro programa do CEPEL utilizado pelo ONS, o ANAREDE (análise de redes em regime); no entanto, os modelos de carga utilizados no ANATEM são os mesmos do ANAREDE (modelos estáticos ZIP). Este artigo apresenta uma metodologia para modelagem de cargas, a partir de dados de medição (*measurement-based load modeling*), cujos resultados foram validados numa implementação no ANATEM.

O artigo se organiza da seguinte maneira: a seção 2 descreve os passos principais da metodologia, desde a escolha do modelo dinâmico de carga, passando pela estimação de parâmetros do modelo utilizando um algoritmo genético, incluindo a definição do espaço de busca de soluções do problema. Na seção 3 é apresentada uma aplicação de modelagem de carga a partir de medições, utilizando os dados medidos de um sistema de distribuição real, com geração local. A validação do modelo estimado, a partir de dados reais, foi feita através de uma simulação no ANATEM, comparando qualitativamente a resposta da carga representada pelo

modelo estimado, durante e após a eliminação de uma falta no sistema, com os resultados de outra simulação que utiliza o modelo estático ZIP, para representar o mesmo ponto do sistema. A seção 4 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 | MODELOS DE CARGAS BASEADOS EM MEDIÇÕES

Modelos de cargas baseados em medições são estimados a partir de variações de tensão (tipicamente afundamentos) causadas por distúrbios originados a montante do medidor. A Fig. 1 ilustra a localização do medidor, cujos dados de interesse são aqueles que registram a resposta de carga para contingências originadas na transmissão. Diferentes dispositivos de aquisição de dados, como medidores de qualidade de energia, registradores de perturbações digitais e PMUs podem ser usados para estimar modelos de cargas baseados em medição.

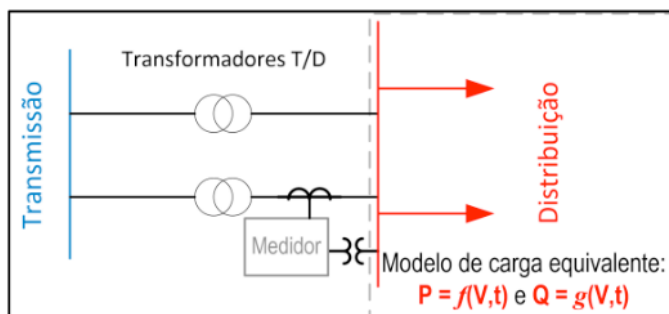


Fig. 1 – Ilustração do local de instalação do medidor de perturbações no PAC entre transmissão e distribuição.

As respostas das cargas são registradas e usadas para derivar uma representação matemática equivalente, relacionando desvios de potência causados por desvios de tensão. A ideia central da metodologia proposta para modelagem de cargas é inspirada na identificação de sistemas, um conjunto de técnicas voltadas para estimar modelos matemáticos paramétricos, usando pares de dados de entrada e saída medidos de um sistema no qual se deseja representar. Os modelos podem ser formulados como equações diferenciais, equações a diferenças, funções de transferência e espaço de estados (LJUNG, 1999). Neste trabalho, é apresentado um modelo formulado como uma equação a diferença, e as funções de transferência discreta e contínua correspondentes, cuja teoria determina as restrições do espaço de busca para qualquer uma das formulações. Os principais conceitos de identificação de sistemas aplicados à metodologia de modelagem de carga baseada em medições são listados abaixo:

- **Selecionar dados de entrada e saída do modelo.** – o modelo de carga deseja mapear desvios de potência causados por desvios de tensão no barramento de carga; valores instantâneos de tensão e corrente, ou valores efi-

cazes e fundamentais da potência e tensão são utilizados para modelagem de carga voltada para estudos em regime ou dinâmicos.

- **Escolher uma estrutura matemática (modelo) parametrizável** – há uma extensa literatura de modelos matemáticos parametrizáveis utilizados para representar cargas agregadas em análise de sistemas (CIGRE WORKING GROUP C4.605, 2014). A escolha pode ser pautada por tipo de estudo, disponibilidade na biblioteca de modelos do *software* de simulação, pelo significado físico do modelo, por comparação entre um ou mais modelos, por facilidade de implementação ou por questões de convergência da simulação.
- **Estimar os parâmetros do modelo a partir de dados reais** – Diferentes heurísticas de otimização se aplicam a essa tarefa, formulando-se a função objetivo como o erro entre a resposta da carga medida e a resposta do modelo simulada. O conjunto de parâmetros que minimizar este erro é escolhido como representação equivalente da carga.
- **Validação do modelo** – Esta etapa pode ser feita submetendo o modelo estimado a um outro conjunto de dados medidos (dados de validação). No presente artigo, a validação foi feita qualitativamente através da simulação no ANATEM, cujos resultados serão mostrados na seção 3.

A seguir, serão apresentadas as etapas da identificação de sistemas aplicadas à modelagem de carga baseada em medições.

## 2.1 Seleção e processamento de dados

O medidor utilizado registrou dados instantâneos de tensão e corrente antes, durante e depois de afundamentos de tensão abaixo de 0,9 p.u. A taxa de amostragem de 1920 Hz corresponde a 32 pontos por ciclo de 60 Hz. A Transformada Discreta de Fourier (TDF) (OPPENHEIM, 1999) foi aplicada nos sinais das três fases de tensões e correntes, através de uma janela deslizante, a fim de se calcular as componentes fundamentais fasoriais das três fases de tensões e correntes, antes, durante e depois da eliminação do afundamento de tensão (por isso a “janela deslizante”, com o “tamanho” do período de amostragem, 1/1920 seg.). A partir dos fasores de tensões e correntes, foram obtidas as componentes de sequência de Fortescue (KUNDUR, 1994), uma vez que as análises de transitórios eletromecânicos utilizam somente as componentes de sequência positiva. Finalmente, a partir das componentes de sequência positiva foram obtidas as componentes real e imaginária da potência aparente, isto é, as potências ativa e reativa. O processamento dos sinais de tensão e corrente instantâneos até as componentes de sequência positiva de potência versus tensão foi resumido na Fig. 2.

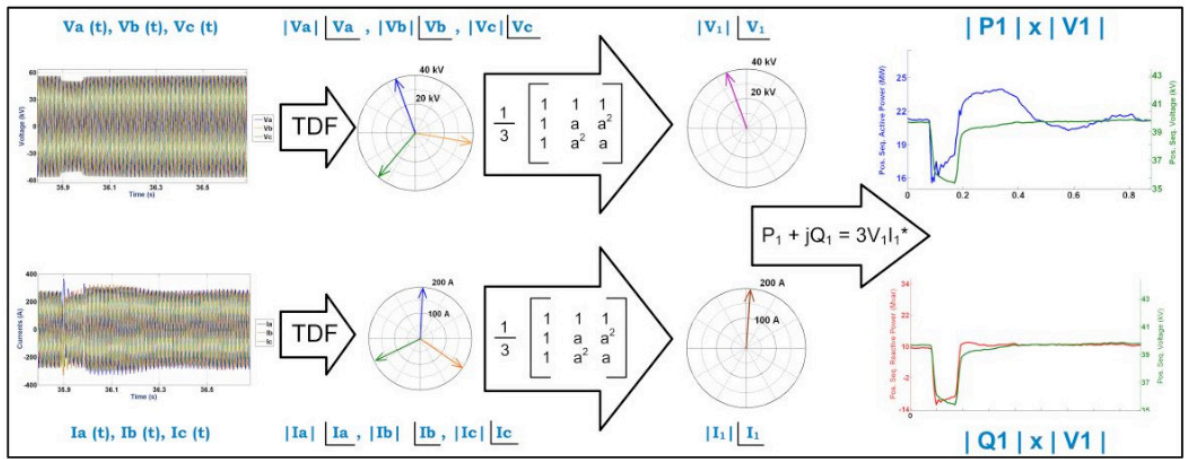


Fig. 2 – Processamento de sinais de tensão e corrente instantâneos medidos, para obter amostras de componentes de sequência positiva, tal que  $P_1=f(V_1)$  e  $Q_1=g(V_1)$ .

Portanto, as relações que se deseja modelar são  $P_1$  (componente de sequência positiva da potência ativa) em função de  $V_1$  (componente de sequência positiva da tensão), e as curvas  $Q_1$  (componente de sequência positiva da potência reativa) em função de  $V_1$ .

## 2.2 Escolha do Modelo de Carga

Modelos de carga podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, onde os primeiros expressam as potências ativa e reativa num instante do tempo, como uma função de desvios de tensão medida no barramento de carga (opcionalmente, levando também em conta os desvios da frequência elétrica do sistema) ocorridos no mesmo instante. Modelos dinâmicos expressam as potências ativa e reativa num instante do tempo, em função de desvios de tensão do barramento de carga medidos naquele instante e nos instantes anteriores.

O modelo dinâmico proposto por (VISCONTI; et al, 2014), formulado em (1), adaptou o modelo autorregressivo (*AutoRegressive with an eXtra input*, ARX) descrito por (LJUNG, 1999) e também por (BOX; JENKINS, 1976). Este modelo é uma combinação linear de valores passados de potência e de tensão, além do valor atual da tensão.

$$\begin{aligned}
 P(t) &= P_0 \left[ \sum_{m=1}^{m=M_p} \omega_{mp} \frac{P(t-m\Delta t)}{P_0} + \sum_{k=0}^{k=K_p} \omega_{kvp} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right] \\
 Q(t) &= Q_0 \left[ \sum_{m=1}^{m=M_q} \omega_{mq} \frac{Q(t-m\Delta t)}{Q_0} + \sum_{k=0}^{k=K_q} \omega_{kvq} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde:

- $M_p, K_p, M_q, K_q$  – Definem a ordem do modelo, e neste trabalho, a escolha foi  $M_p = K_p = M_q = K_q = 2$ , caracterizando o modelo linear escolhido como de 2ª ordem. Logo,  $m$  e  $k$  variam de 1 a 2 e de 0 a 2, respectivamente.
- $V_o, P_o, Q_o$ , são respectivamente as amostras de tensão, potências ativa e reativa em regime permanente, isto é, correspondem ao ponto de operação antes da ocorrência de um distúrbio capaz de causar um desvio de tensão no barramento de carga sob análise.
- $\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}, \omega_{2vp}, \omega_{1q}, \omega_{2q}, \omega_{0vq}, \omega_{1vq}, \omega_{2vq}$  são os parâmetros a serem estimados, tanto para o modelo da potência ativa, quanto para o modelo da potência reativa.
- $\Delta t$  – é o inverso da taxa de amostragem (*sampling rate*) do medidor, isto é o período de intervalo entre as amostras da medição. Assim, para uma taxa de amostragem de 1920Hz (configuração do medidor cujos dados são analisados neste artigo), a diferença entre a amostra atual  $V(t)$  e a imediatamente anterior  $V(t-1)$  é de 1/1920 segundos, isto é cerca de 0.52ms.
- $P(t), P(t-\Delta t), P(t-2\Delta t), V(t), V(t-\Delta t), V(t-2\Delta t)$  – correspondem às amostras de potência e tensão do “instante atual”  $t$  e às amostras registradas (tipicamente no *buffer* do medidor) um período ( $\Delta t$ ) e dois períodos ( $2\Delta t$ ) anteriores.

As equações seguintes serão apresentadas apenas para a potência ativa, sendo a formulação para a potência reativa idêntica, mudando apenas as variáveis análogas. Como condição de contorno do problema, por definição,  $P(t=0)=P_o$ ,  $Q(t=0)=Q_o$  e  $V(t=0)=V_o$ . Logo, a primeira restrição linear dos parâmetros do modelo (1) é dada por (2):

$$\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp} + \omega_{2vp} = 1 \quad (2)$$

Aplicando a transformada Z (OPPENHEIM, 1999) em (1) obtém-se a formulação do modelo de carga em termos de funções de transferência (BOX; JENKINS, 1976). A Tabela 1 mostra as funções de transferência tanto no domínio de tempo discreto, quanto no domínio de tempo contínuo. A correspondência entre as formulações pode ser obtida através da transformada de Tustin (CHUANG et al., 1997).



Funções de transferência	
$H(z)$ – tempo discreto	$H(s)$ – tempo contínuo
$\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0} \left[ \frac{\omega_{0vp}z^2 + \omega_{1vp}z + \omega_{2vp}}{z^2 - \omega_{1p}z - \omega_{2p}} \right]$	$\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0} \left[ \frac{\alpha_{0vp}s^2 + \omega\alpha_{1vp}s + \alpha_{2vp}}{s^2 + \alpha_{1p}s + \alpha_{2p}} \right]$
<b>ou</b>	<b>ou</b>
$\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0} \left[ \frac{(z + r_{z1p})(z + r_{z2p})}{(z + p_{z1p})(z + p_{z2p})} \right]$	$\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0} \left[ \frac{(s + r_{s1p})(s + r_{s2p})}{(s + p_{s1p})(s + p_{s2p})} \right]$

Tabela 1 – Representações do modelo proposto através de funções de transferência equivalentes

Onde:

- $\alpha_{1p}, \alpha_{2p}, \alpha_{0vp}, \alpha_{1vp}, \alpha_{2vp}$  são os parâmetros a serem estimados para a função de transferência no domínio do tempo contínuo da potência ativa.
- $V(s), P(s), Q(s)$  são os sinais de tensão, potências ativa e reativa filtrados pela transformada de Laplace (OPPENHEIM, 1999).
- $V(z), P(z), Q(z)$  são os sinais de tensão, potências ativa e reativa, após a transformada Z.
- $r_{z1p}$  e  $r_{z2p}$  são os zeros, ao passo que  $p_{z1p}$  e  $p_{z2p}$  são os polos de  $H(z)$ .
- $r_{s1p}$  e  $r_{s2p}$  são os zeros, ao passo que  $p_{s1p}$  e  $p_{s2p}$  são os polos de  $H(s)$ .

O modelo ARX proposto em (1) e as funções de transferência da Tabela 1 são equivalentes, levando em consideração que a conversão entre os domínios contínuo e discreto está associada ao período de amostragem dos sinais de entrada e saída do sistema, isto é, no domínio discreto, assume-se que as amostragens são constantes durante o período de amostragem. Numa simulação de transitórios eletromecânicos que utilize estes modelos, o passo de integração da simulação deve ser menor do que esse período de amostragem.

### 2.3 Estimação de parâmetros com Algoritmo Genético

Algoritmo Genético (AG) pode ser definido como uma estratégia de busca de soluções inspirada na teoria da evolução de Charles Darwin (MICHALEWICZ, 1995). A solução para o problema de otimização deve ser codificada e o exemplo mais didático da codificação da solução de um problema de otimização utilizando AG consiste em representar um número inteiro na base binária; o que implica que a solução numérica a ser buscada pelo AG seria um vetor de “zeros” e “uns”. Este vetor seria o *cromossoma* do AG (ou *indivíduo* de uma *população* de soluções). A

Tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo ARX (1) e os parâmetros para cada uma das formulações através de funções de transferência, tanto contínua quanto discreta (Tabela 1). Os parâmetros são números reais, exceto na codificação dos parâmetros em termos de zeros e polos, que podem assumir a forma de números complexos.

ARX	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$
$H(z) = \frac{P(z)}{V(z)}$	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$ ou $\theta_p = [r_{z1p}, r_{z2p}, p_{z1p}, p_{z2p}]$
$H(s) = \frac{P(s)}{V(s)}$	$\theta_p = [\alpha_{0vp}, \alpha_{1vp}, \alpha_{2vp}, \alpha_{1p}]$ ou $\theta_p = [r_{s1p}, r_{s2p}, p_{s1p}, p_{s2p}]$

Tabela 2. Diferentes codificações dos parâmetros do modelo proposto

Onde:

$\theta_p$  – conjunto de parâmetros a ser estimado pelo AG, de acordo com a escolha do modelo.

Os parâmetros  $\omega_{2vp}$  e  $\alpha_{2p}$  não foram incluídos porque  $\omega_{2vp} = 1 - \omega_{1p} - \omega_{2p} - \omega_{0vp} - \omega_{1vp}$  e, aplicando a transformada de Tustin em  $H(z)$  com as condições de contorno (2) resulta sempre em  $\alpha_{2p} = \alpha_{2vp}$ . O processo de otimização a partir de AG pode ser resumido nos seguintes passos:

**a) Cria-se uma população de soluções para o problema, sujeitas a restrições lineares e/ou não lineares** – o programador deve estabelecer uma rotina computacional para gerar uma *população* (conjunto de *indivíduos* ou *cromossomas*), onde cada elemento (ou *gene*) do *cromossoma* deve respeitar eventuais limites inferiores e superiores que cada *gene* pode assumir. Para o modelo ARX escolhido e seus equivalentes, a Tabela 3 apresenta as restrições que os parâmetros devem respeitar (BOX; JENKINS, 1976), definindo assim o espaço de busca de soluções do problema.

ARX	$\omega_{2vp} = 1 - (\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp})$ e $-1 < \omega_{2p} < 1$ e $\omega_{2p} - \omega_{1p} < 1$ e $\omega_{2p} + \omega_{1p} < 1$
H(z)	$ p_{z1p}  < 1$ e $ p_{z2p}  < 1$
H(s)	$\text{Re}\{p_{s1p}\} < 0$ e $\text{Re}\{p_{s2p}\} < 0$

Tabela 3. Equações e inequações lineares de restrição ao espaço de busca de soluções

A Tabela 3 lista as restrições de estabilidade para funções de transferência discretas, requisitando que o módulo dos polos  $p_{z1p}$  e  $p_{z2p}$  sejam menores que um, enquanto para funções de transferência contínuas, a parte real dos polos deve ser menor que zero (BOX; JENKINS, 1976).

**b) Definem-se operadores de seleção, combinação (*crossover*) e mutação**

– Entre as iterações do AG, as populações evoluem com os operadores de seleção, *crossover* e mutação. A seleção de indivíduos copiados para a próxima geração, ou os que serão escolhidos para se combinarem como pais e mães, ou mesmo escolhidos para a mutação depende de como o programador configura estes operadores. A população seguinte será dividida entre indivíduos copiados da geração anterior (a seleção natural dos mais aptos), indivíduos criados a partir da combinação de pares de indivíduos da geração anterior (*crossover*) e indivíduos copiados da geração anterior, com um de seus elementos (genes) com uma variação aleatória (mutação).

**c) Determina-se uma função objetivo ou de avaliação**

– é o mecanismo de avaliação da solução do problema de otimização codificada em cada indivíduo da população de soluções. Tipicamente, a função objetivo é uma medida de erro (erro médio quadrático, norma euclidiana) entre a medição e a simulação, isto é, a partir de uma curva de potência medida, compara-se cada amostra da curva medida com o resultado da curva simulada pelo modelo parametrizado por um indivíduo da população, o que significa que a cada geração (iteração AG), todos os indivíduos são avaliados e os “mais aptos” tem “maior chance de sobrevivência”. A eq. (4) apresenta a função objetivo utilizada para cálculo do erro entre a potência ativa medida e simulada.

$$F_{obj}(\theta_p) = \frac{1}{N} \sum_{ev=1}^N \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left( \frac{P_{med}(ev, t) - P_{calc}(ev, t, \theta_p)}{P_{med}(ev, t, \theta_p)} \right)^2 \quad (4)$$

Onde:

$P_{med}$ ,  $P_{calc}$  – são, respectivamente, os dados de potência medida e calculadas pelo modelo.

$ev$  – é o índice do evento, por definição consiste em um conjunto de amostras de potência e tensão antes, durante e depois de um desvio de tensão maior  $V(t)/V_0 < 0,9$  p.u.

$n$  – é o número de amostras de um evento  $ev$ .

$N$  – é o número total de eventos  $ev$ , selecionados como dados de treinamento.

A seguir, a Fig. 3 e a Fig. 4 ilustram a estimação de parâmetros do modelo (1) para representar 4 eventos ( $N=4$ ) com o mesmo conjunto de parâmetros. A Fig. 3 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* da 1ª geração do AG, enquanto a Fig. 4 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* para a 20ª geração

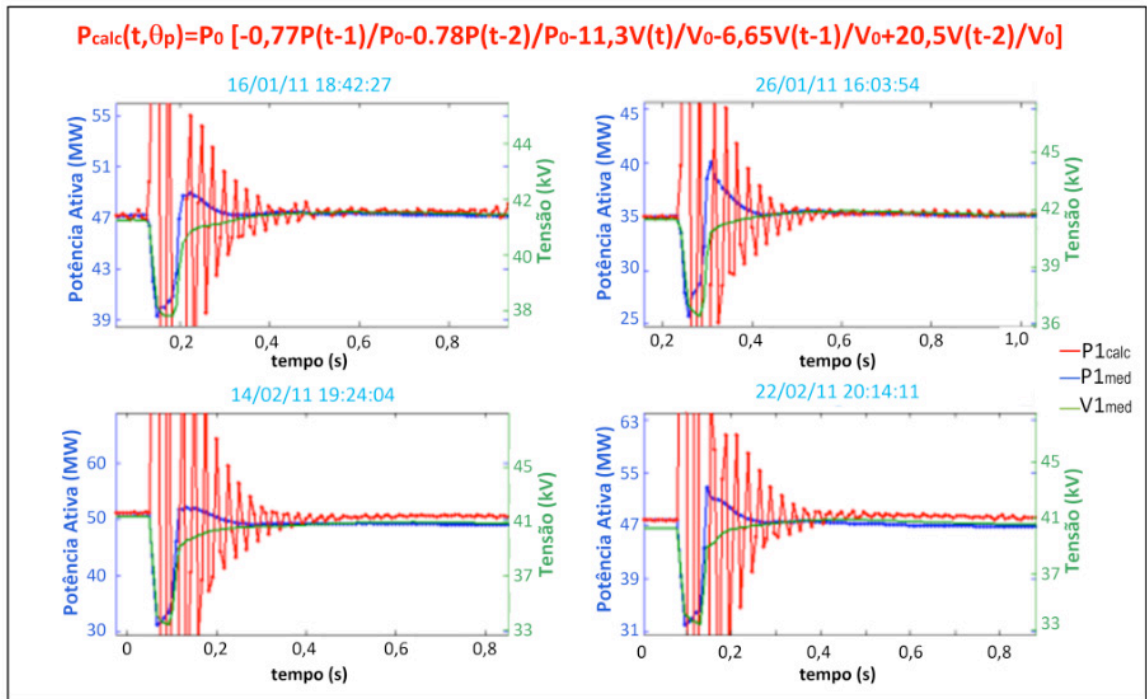


Fig. 3 – Melhor solução da 1ª iteração do AG para modelar 4 eventos.

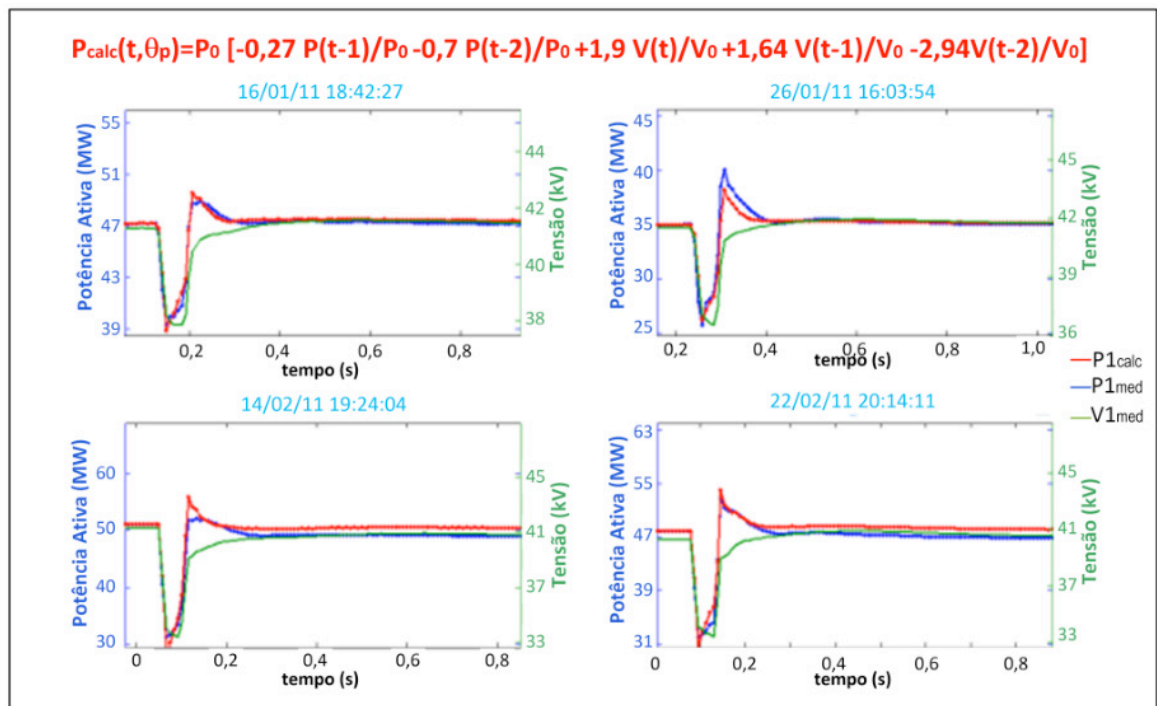


Fig. 4 – Melhor solução após 20 iterações do AG para modelar os mesmos 4 eventos.

### 3 I RESULTADOS

#### 3.1 Modelagem de um sistema de distribuição com geração

Esta seção utilizará o registro de um distúrbio originado na transmissão e medido no lado de baixa de um transformador T/D (Fig. 1), que separa uma empresa de transmissão do SIN de uma empresa de distribuição, que possui dois geradores térmicos de 111MW e 30 MW. De acordo com o relatório de ocorrências

da transmissora, o distúrbio foi causado por uma descarga atmosférica, que desligou uma linha do sistema de transmissão bem próxima ao transformador que tinha o medidor instalado. A Fig. 5 apresenta a potência medida (curva vermelha), a potência simulada pelo modelo com parâmetros estimados (curva azul) e a potência simulada pelo modelo de carga impedância constante (curva verde), adotado pelo ONS para este sistema de distribuição conectado ao SIN. A Fig. 6 apresenta a potência reativa do mesmo evento. Tanto a resposta do modelo estimado, quanto a do modelo de impedância constante foram calculados a partir dos dados de tensão medida. A estimação dos parâmetros foi feita de forma a minimizar o erro entre a potência medida e a potência simulada pelo modelo proposto. Observa-se uma oscilação eletromecânica amortecida após a eliminação da falta pela proteção, interpretada como a aceleração e desaceleração das máquinas do sistema de distribuição em relação à frequência síncrona do sistema, diferente de sistemas de distribuição sem geração própria.

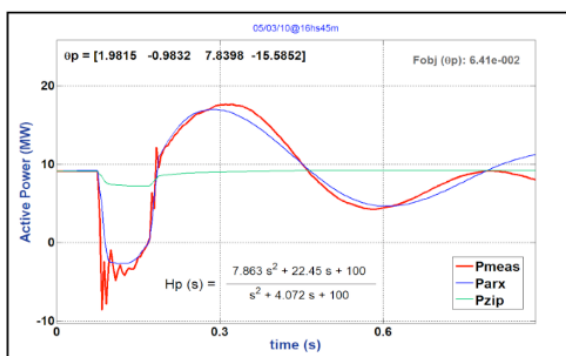


Fig. 5 - Estimação de Parâmetros para a potência ativa (P).

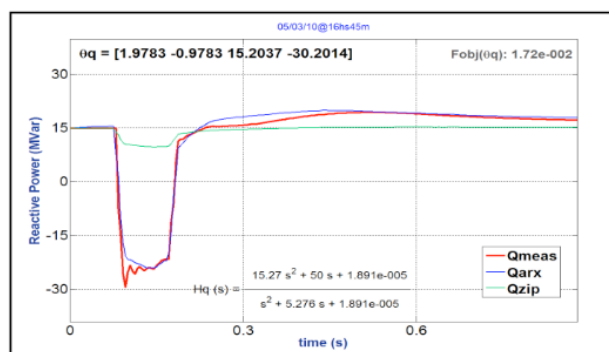


Fig. 6 - Estimação de Parâmetros para a potência reativa (Q)

A solução final estimada pelo AG para a potência ativa resultou em uma função de transferência  $H_p(s)$  com polos complexos, que foi capaz de reproduzir a oscilação amortecida após a eliminação do defeito. Estes resultados mostram o quão distante podem ser os resultados de uma simulação com a modelagem de carga muito genérica. O resultado gráfico do modelo de impedância constante (curva verde) ilustra o conceito de modelagem de carga muito otimista, subestimando a resposta da carga ao afundamento de tensão registrado. Já a solução final estimada pelo AG para a potência reativa ilustrou uma impossibilidade matemática do modelo de impedância constante: durante o afundamento, a potência reativa assume valores negativos (uma inversão de fluxo), o que seria impossível representar em um modelo que formula a resposta da potência reativa proporcional ao quadrado dos desvios de tensão.

A fim de verificar a eficácia desta modelagem foram estimados modelos para mais de 30 sistemas de distribuição próximos ao local do distúrbio descrito acima.

Todos estes modelos de carga, tanto para potência ativa, quanto para a potência reativa, foram implementados no ANATEM (ELETROBRAS CEPEL, 2010), aplicativo computacional desenvolvido pelo CEPEL e utilizado no setor elétrico brasileiro para análise de transitórios eletromecânicos. Os dados de entrada do programa com todos os elementos da rede básica do SIN estão disponibilizados no formato do ANATEM pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No entanto, os sistemas de distribuição conectados ao SIN não têm as suas topologias detalhadas, são representados com modelos ZIP (IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE, 1993). Assim sendo, foi feita uma simulação de curto-circuito e abertura de linha, próximos ao mesmo transformador citado anteriormente.

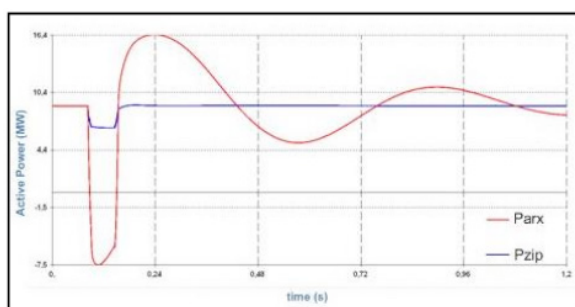


Fig. 7 - Potência Ativa simulada na barra de 69 kV com Z constante ( $P_{zip}$ ) e com o modelo estimado ( $P_{arx}$ )

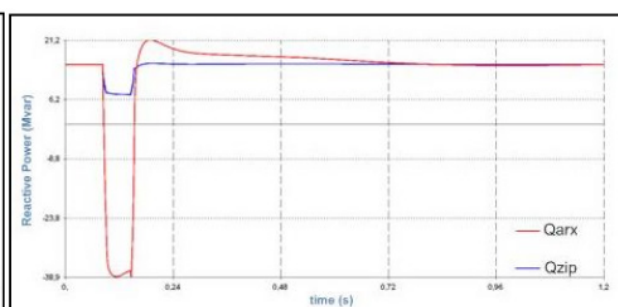


Fig. 8 - Potência Reativa simulada na barra de 69 kV com Z constante ( $Q_{zip}$ ) e com o modelo estimado ( $Q_{arx}$ )

A resposta do modelo de impedância constante é comparada com as funções de transferência estimadas e apresentadas na Fig. 5 e na Fig. 6. Os resultados do ANATEM aparecem na Fig. 7 e na Fig. 8. Percebe-se qualitativamente que a resposta ao afundamento de tensão dos modelos de carga baseados em medição é muito mais próxima do que foi medido do que a resposta do modelo de impedância constante.

#### 4 | CONCLUSÕES

Este trabalho descreve uma metodologia de modelagem de cargas a partir de dados medidos, para a obtenção de resultados mais precisos nas simulações de transitórios eletromecânicos. No entanto, ao referenciar as etapas principais da identificação de sistemas como fundamento da metodologia, há o intuito de apresentar um procedimento genérico para modelagem em outras aplicações que disponham de dados medidos da entrada e saída de um sistema de interesse.

O algoritmo genético foi utilizado pela sua simplicidade de implementação e também por ser menos sensível a inicialização do problema, isto é, não há necessidade de se determinar quais devem ser os valores iniciais da *população* de

*indivíduos*, desde que as restrições sejam respeitadas.

Para redes de distribuição ativas com geração térmica, foi preciso restringir o espaço de buscas dos polos da função de transferência  $H(s)$  para números complexos (cuja transformada inversa de Laplace resulta em uma senóide de amplitude decrescente). Portanto, merece destaque que não basta seguir os passos da identificação de sistemas, é preciso que o especialista entenda a natureza do sistema que se deseja modelar, analise graficamente os dados de entrada e saída típicos do sistema, e busque definir o espaço de buscas de soluções de modo a auxiliar a convergência do processo de otimização da estimação de parâmetros.

## REFERÊNCIAS

BOX, G.; JENKINS, G. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. New Jersey, EUA: Holden-Day Inc., 1976. 575 p. Impresso.

CHUANG, H. D.; *et al.* Development of a dynamic ZIP-motor load model from on-line field measurements. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 459-468, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061597000161>. Acesso em: 4 dez. 2019.

ELETROBRAS CEPEL. **Programa Anatem – Análise de Transitórios Eletromecânicos**: Manual do Usuário. 3. ed. aum. Rio de Janeiro, Brasil: [s. n.], 2010.

IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE. Load representation for dynamic performance analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 472-482, 1993. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/260837>. Acesso em: 4 dez. 2019.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 1. ed. New York City, EUA: McGraw-Hill Inc., 1994. 1176 p. ISBN 0-07-035958-X.

LJUNG, L. **System Identification: Theory For The User**. 2. ed. New Jersey, EUA: PTR Prentice Hall, 1999. 609 p. ISBN 0-13-656695-2.

CIGRE WORKING GROUP C4.605. **Modeling and aggregation of loads in flexible power networks**. [S. l.]: Cigré, 2014. Disponível em: <https://e-cigre.org/publication/566-modelling-and-aggregation-of-loads-in-flexible-power-networks>. Acesso em: 4 dez. 2019.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 3. ed. aum. EUA: Springer, 1995. 387 p. ISBN 3-540-60676-9.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. **Procedimentos de Rede Submódulo 18.2**: Modelos Computacionais, 25 mar. 2002.

OPPENHEIM, A. V.; *et al.* **Discrete-time signal processing**. 2. ed. Upper Sadle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999. Impresso.

VISCONTI, Igor; *et al.* Measurement-Based Load Modeling Using Transfer Functions for Dynamic Simulations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 1, p. 111-120, 2014. DOI 10.1109/TPWRS.2013.2279759. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6594923>. Acesso em: 4 dez. 2019.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Abrasômetro 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56

Adesão 23, 31, 32

Ajuste automático 72, 190

Algoritmo genético 36, 37, 42, 47, 72, 73, 75, 76, 78, 79, 80, 81

Aprendizado de máquina 12

Aprendizagem de máquinas 58, 176

Arquitetura paralela 83, 84

Autoleitura 11, 12, 13, 14, 21

Automação 49, 51, 53, 56, 59, 60, 81, 95, 109, 124, 133, 135, 137, 151, 153, 157, 161, 170, 187, 198

Avaliação experimental 96, 109

### B

Barreiras 23, 32, 33

### C

Calorímetro de alta pressão 96

Casas inteligentes 23, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 33

Consumo de energia 12, 13, 14

Controlador fuzzy 135, 142, 143, 145, 146

Controlador PI 1, 99, 124, 131

Controlador PID 72, 74, 75, 79, 81

Controle de processos 135, 136

Controle híbrido 95, 97, 99, 102, 105, 107, 108

Controle PID 74, 78, 83

### E

Energia eólica 1, 2, 4

Erro de quantização 124, 125, 126, 127, 133, 134

Estabilidade transitória 36

### F

Fuzzy 58, 59, 61, 63, 69, 70, 123, 135, 136, 138, 142, 143, 144, 145, 146, 159, 160, 170, 171, 187, 188, 194, 198, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 216, 222, 223, 225, 239

### G

Gás natural 58, 59, 69, 70

### H

HOG 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22



## I

Identificação de sistemas 36, 38, 39, 47, 48, 116, 124, 128, 134, 209

## L

Ladder 135, 136, 144, 145

Lógica fuzzy 59, 61, 63, 135, 138, 170, 207

LSS 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22

## M

Máquinas de ensaio 49, 51

Modelagem de carga 36, 37, 38, 39, 46

Modelos matemáticos 1, 3, 10, 38, 39, 128, 135

## P

Países desenvolvidos 23, 24, 26, 28, 29

Países emergentes 23, 27, 28, 29, 31

Processamento de imagens 12, 21

Protótipo 73, 79, 82, 83, 84, 86, 93, 148, 149, 150, 167, 168, 189, 196

## R

Reconhecimento 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 21, 110, 112, 113, 123, 174, 176, 179, 203, 204, 210

Refrigeração com dióxido de carbono 96

Robô delta 83, 93, 94

## S

Servomecanismo 124, 125, 126, 127, 128, 131, 132, 133, 134

Sistema de posicionamento 83

Supervisor 52, 54, 55, 82, 85, 88, 135, 145

Svm 12, 14, 17, 19, 21, 22

## T

Tomada de decisão inteligente 58

Turbina eólica 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10

## V

Válvulas automáticas industriais 95, 96

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**