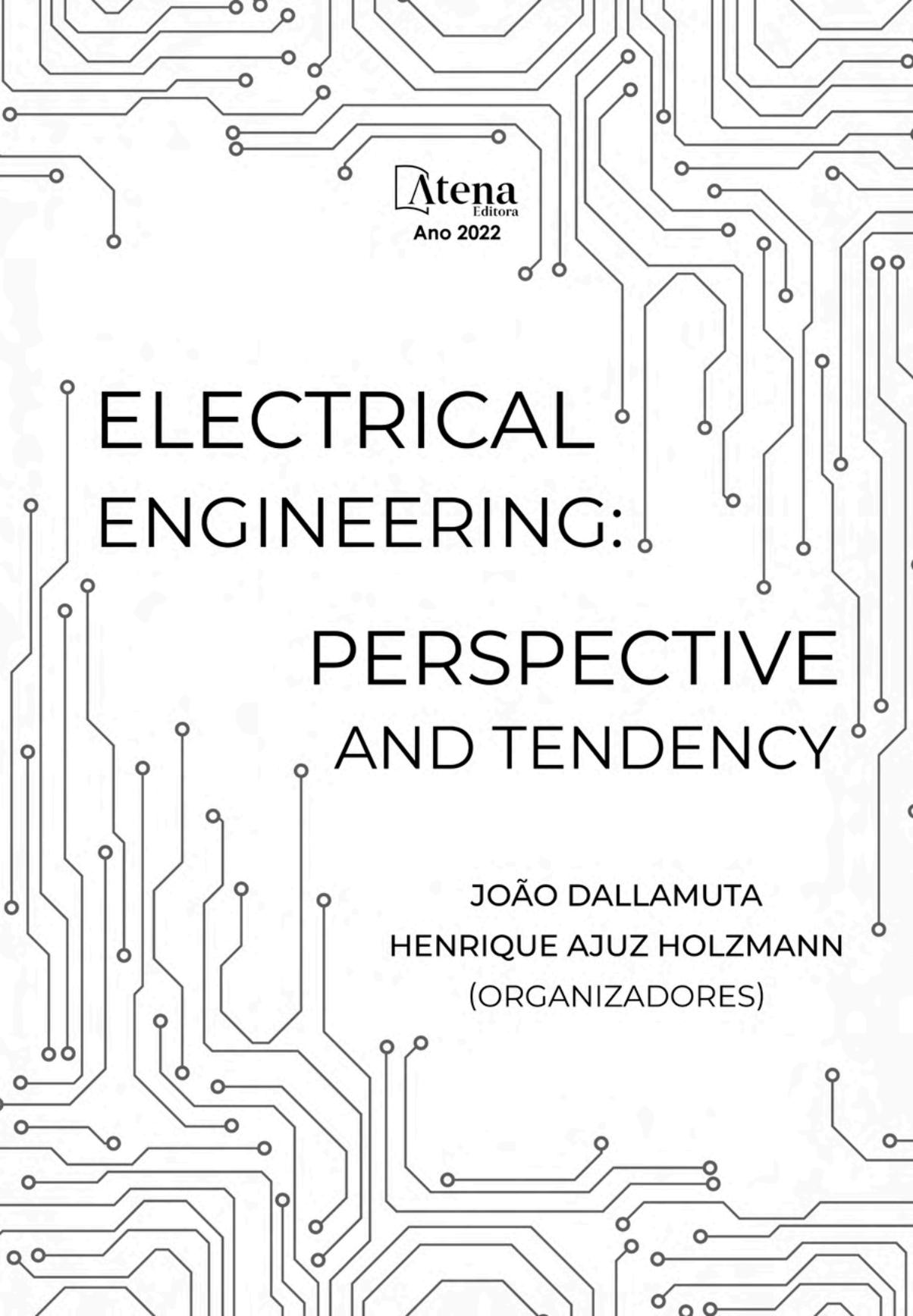


Atena  
Editora  
Ano 2022

# ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)



Atena  
Editora  
Ano 2022

# ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

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

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

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

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
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  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
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. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Electrical engineering: perspective and tendency

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E38 Electrical engineering: perspective and tendency /  
Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz  
Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0375-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.753222106>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João  
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.  
Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro electricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

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

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

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

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **DETECÇÃO DE PATOLOGIAS VOCAIS POR MEIO DO USO DE MODELOS AUTO REGRESSIVOS E ALGORITMO KNN**

Winnie de Lima Torres

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Aldayr Dantas de Araújo

Allan de Medeiros Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221061>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

#### **APRENDIZAGEM BASEADA EM METODOLOGIA ATIVA NO ENSINO DE FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA**

Márcio Mendonça

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Carlos Renato Alves de Oliveira

Lucas Botoni de Souza

Kazuyochi Ota Junior

Gilberto Mitsuo Suzuki Trancolin

Augusto Alberto Foggiano

Luiz Francisco Sanches Buzachero

Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

Luiz Henrique Geromel

Marcio Aurelio Furtado Montezuma

Emerson Ravazzi Pires da Silva

Fábio Rodrigo Milanez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221062>

### **CAPÍTULO 3..... 27**

#### **A VIRTUAL REALITY APPLICATION FOR TRAINING LOCOMOTIVE OPERATORS**

Pablo Pereira e Silva

Rodrigo Varejão Andreão

Mário Mestría

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221063>

### **CAPÍTULO 4..... 40**

#### **OPEN LOOP CONTROL SYSTEM AND TOOLS FOR DATA ACQUISITION AND ESTIMATION OF THE WELD BEAD DEPTH IN GMAW PROCESS**

Guillermo Alvarez Bestard

Renato Coral Sampaio

Sadek Crisostomo Absi Alfaro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221064>

### **CAPÍTULO 5..... 56**

#### **PREMISSAS E PERSPECTIVAS DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DO**

## SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Bruno Knevez Hammerschmitt  
Felipe Cirolini Lucchese  
Marcelo Bruno Capeletti  
Leonardo Nogueira Fontoura da Silva  
Fernando Guilherme Kaehler Guarda  
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221065>

## **CAPÍTULO 6..... 68**

### SISTEMA RETIFICADOR/INVERSOR COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA APLICADO AO ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃS PERMANENTES

Pedro Cerutti Bolsi  
Edemar de Oliveira Prado  
Hamiltom Confortin Sartori  
José Renes Pinheiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221066>

## **CAPÍTULO 7..... 84**

### UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA NA REGIÃO DE SEGURANÇA DINÂMICA DEVIDO A BIFURCAÇÕES

Murilo Eduardo Casteroba Bento

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221067>

## **CAPÍTULO 8..... 92**

### UM MÉTODO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE CONTROLADORES CENTRALIZADOS DE AMORTECIMENTO

Murilo Eduardo Casteroba Bento

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221068>

## **CAPÍTULO 9..... 102**

### TRAÇADOR DE CURVAS PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA PAINÉIS PV USANDO UM CONVERSOR CC-CC

Romário de J. Nazaré  
Leandro L. O. Carralero  
Fabiano F. Costa  
André P. N. Tahim

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221069>

## **CAPÍTULO 10..... 117**

### METODOLOGIA AVALIATIVA REMOTA APLICADA À UMA DISCIPLINA DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA: RELATO DE CASO

Bruno Knevez Hammerschmitt  
Felipe Cirolini Lucchese  
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.75322210610>

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>127</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>128</b>

## UM MÉTODO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE CONTROLADORES CENTRALIZADOS DE AMORTECIMENTO

*Data de aceite: 01/06/2022*

*Data de submissão: 01/04/2022*

**Murilo Eduardo Casteroba Bento**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro  
<https://orcid.org/0000-0002-5285-103X>

**RESUMO:** Controladores centralizados de amortecimento baseados em medições fasoriais sincronizadas mostraram ser efetivos na melhoria das taxas de amortecimento de modos de oscilação de sistemas de potência. Entretanto, falhas de comunicação como ataques cibernéticos podem afetar a operação desejada do controlador centralizado. Este trabalho propõe um método baseado em problema de otimização para o projeto de controladores centralizados de amortecimento cujo objetivo é aumentar as taxas de amortecimento dos modos de oscilação do sistema e reduzir o número de sinais de entrada e saída necessário para a operação do controlador e reduzir os ganhos do controlador. Um número reduzido de sinais permite um maior foco de segurança pelo centro de operação de sistema de potência. Estudos de casos são apresentados para o IEEE 39 barras considerando análise modal e simulações dinâmicas. Os resultados alcançados mostram a capacidade do método em atender os requisitos desejados e impostos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade a Pequenos Sinais, Otimização, Controladores de Amortecimento, Unidade de Medição Fasorial.

### A METHOD BASED ON OPTIMIZATION FOR THE DESIGN OF CENTRALIZED DAMPING CONTROLLERS

**ABSTRACT:** Centralized damping controllers based on synchronized phasor measurements have been shown to be effective in improving the damping ratios of power system oscillation modes. However, communication failures such as cyber-attacks can affect the desired operation of the centralized controller. This work proposes an optimization problem-based method for the design of centralized damping controllers whose objective is to increase the damping rates of the power system oscillation modes and reduce the number of input and output signals required for the operation of the controller and reduce controller gains. A reduced number of signals allows for greater safety focus across the power system operation center. Case studies are presented for the IEEE 39-bus considering modal analysis and dynamic simulations. The results achieved show the ability of the method to meet the desired and imposed requirements.

**KEYWORDS:** Small-Signal Stability, Optimization, Damping Controllers, Phasor Measurement Units.

## 1 | INTRODUÇÃO

Unidades de Medição Fasorial, ou do inglês, Phasor Measurement Units (PMUs) são capazes de medir tensões e correntes com altas taxas de amostragem e sincronia no tempo nas barras onde estão instalados. PMUs são elementos do Sistema de Medição Fasorial

Sincronizada (SMFS) e seu desenvolvimento permitiu que o operador do sistema elétrico tenha informações em tempo das grandezas elétricas do sistema. Esta disponibilidade de dados reais do sistema promoveu frentes de pesquisa para o desenvolvimento de ferramentas para o monitoramento, controle e proteção de sistemas elétricos compostos por SMFS (TERZIJA et al, 2011).

Em pesquisas de controle, o projeto de controladores centralizados de amortecimento (CCAs) baseados em dados de PMUs mostraram-se efetivos na melhoria das taxas de amortecimento dos modos inter-áreas de sistemas de potência (BENTO, 2020). Os atuais Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) têm efeito limitado na melhoria das taxas de amortecimento, pois não possuem informações globais do sistema elétrico e o SMFS é capaz de fornecer esta observabilidade maior do sistema. No entanto, o projeto de CCAs apresenta desafios não encontrados no projeto de ESPs como: (i) atrasos de tempo presentes na transmissão de pacotes de dados de PMUs para o centro de controle, (ii) vulnerabilidade dos canais de comunicação a falhas devido a ataques cibernéticos ou características físicas.

O uso da aproximação de Padé é o modelo matemático mais utilizado para representar atrasos de tempo fixo na transmissão de dados de PMUs (BENTO, 2020). Além disso, ele modelo utiliza um buffer que segura os pacotes de dados até um limite máximo de tempo para serem efetivamente utilizados pelo CCA. Há diferentes estratégias propostas para lidar com as falhas dos canais de comunicação do CCA. A princípio caso fosse detectado alguma falha, o CCA seria completamente desligado (ZHANG et al, 2013). Posteriormente, métodos foram propostos para lidar com perdas temporárias e permanentes de dados de PMUs (BENTO, 2020). Recentemente, uma estratégia foi desenvolvida para identificar um ataque cibernético do tipo Injeção de Dados Falsos e não comprometer a operação do CCA (ZHAO et al, 2021). Os resultados até o momento são promissores, mas melhorias são necessárias para garantir a operação adequada do CCA em sistemas de potência.

Este trabalho propõe um método baseado em problema de otimização para o projeto de controladores centralizados de amortecimento cujo objetivo é aumentar as taxas de amortecimento dos modos de oscilação do sistema e reduzir o número de sinais de entrada e saída necessário para a operação do CCA e reduzir os ganhos do CCA. Quanto maior o número de canais do CCA, maiores são as chances de uma falha de comunicação afetar a operação desejada do CCA. Assim, uma medida preventiva seria o CCA operar com poucos canais de comunicação. Ganhos reduzidos em módulo do CCA diminuem os efeitos dos sinais de controle caso o CCA esteja operando sob falhas e assim também funciona como uma medida preventiva. O problema de otimização é resolvido utilizando a metaheurística Otimização por Enxame de Partículas (KENNEDY et al, 1995).

Este trabalho apresenta a seguinte organização: Seção 2 apresenta o modelo matemático de sistema de potência, do atraso de tempo e do CCA, Seção 3 descreve o problema de otimização, Seção 4 apresenta estudos de casos para avaliar o método

proposto e Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 | MODELOS

Qualquer sistema de potência interconectado pode ser representado pelas seguintes equações em espaço de estados (KUNDUR, 1994)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

onde  $x$ ,  $y$  e  $u$  são os vetores de variáveis de estado, saída e entrada respectivamente, e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são as matrizes de estado, de entrada e de saída respectivamente.

O atraso de tempo será modelado pela aproximação de Padé de segunda ordem dada por (BENTO, 2020)

$$G(s) = \frac{6-2Ts}{6+4Ts+T^2s^2} \quad (3)$$

onde  $T$  é o atraso de tempo. Esta função de transferência pode ser transformada em equação em espaço de estados utilizando a representação canônica observável de Jordan e, assim, tem-se

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_d \quad (4)$$

$$y_d = C_d x_d \quad (5)$$

O atraso de tempo deve ser considerado na entrada e na saída do CCA e assim será utilizado dois modelos dados por (4)-(5) com índices  $i$  e  $o$ . O atraso de tempo será considerado fixo em 200 ms assim como (BENTO, 2020). Assim, (1)-(3) serão conhecidos pelo projetista e podem ser representados em um único modelo em espaço de estados dado por

$$\dot{\hat{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \quad (6)$$

$$y_{do} = \bar{C}\bar{x} \quad (7)$$

onde

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & BC_{di} & 0 \\ 0 & A_{di} & 0 \\ B_{do}C & 0 & A_{do} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{di} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{C} = [0 \quad 0 \quad C_{do}] \quad (10)$$

O CCA, propósito deste trabalho, pode ser formulado como

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c y \quad (11)$$

$$u = C_c x_c + D_c y \quad (12)$$

ou por uma matriz de funções de transferência

$$W(s) = C_c(sI - A_c)^{-1}B_c + D_c \quad (13)$$

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_{1,1}(s) & \cdots & w_{1,p}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{p,1}(s) & \cdots & w_{p,p}(s) \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde cada elemento  $w_{k,l}$  para  $k=1, \dots, p$  e  $l=1, \dots, p$  pode ser descrito por

$$w_{k,l}(s) = \frac{N_{k,l}^2 s^2 + N_{k,l}^1 s + N_{k,l}^0}{s^2 + D_{k,l}^1 s + D_{k,l}^0} \quad (15)$$

Se o CCA estiver na forma canônica observável e os polos forem conhecidos e fixos, as matrizes  $A_c$  e  $C_c$  e os elementos  $D_{k,l}^1$  e  $D_{k,l}^0$  são conhecidos e fixos. Assim, o projeto de controle consiste em identificar as matrizes  $B_c$  e  $D_c$  ou os elementos  $N_{k,p}^2$ ,  $N_{k,l}^1$  e  $N_{k,l}^0$ .

O sistema de controle de malha fechada para avaliação dos requisitos do projeto pode ser dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \hat{A} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

onde

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \bar{A} + \bar{B}D_c\bar{C} & \bar{B}C_c \\ B_c\bar{C} & A_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

As matrizes que definem o controlador centralizado,  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$  e  $D_c$ , são objetivo de projeto deste trabalho. A busca pelos parâmetros do CCA devem satisfazer certos requisitos de projeto: (i) a taxa de amortecimento de todos os autovalores do sistema de malha fechada deve ser superior a 5%, (ii) o módulo do ganho de cada controlador em (15),  $|N_{k,l}^0/D_{k,l}^0|$ , deve ser baixo e (iii) o número de sinais de entrada e saída do CCA deve ser baixo.

### 3 | MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para o projeto do CCA consiste em resolver um problema de otimização utilizando a metaheurística Otimização por Enxame de Partículas. Os polos do CCA serão fixos e assim as variáveis do CCA serão as matrizes  $B_c$  e  $D_c$ . A função objetivo consiste em (i) reduzir a diferença entre a taxa de amortecimento mínimo desejado  $\zeta_0=0,05$  e a taxa de amortecimento mínima encontrada para o candidato a controlador  $\zeta(B_c, D_c)$ , (ii) reduzir o número de sinais de entrada e saída (NSES) do CCA, e (iii) reduzir o ganho de cada elemento do CCA,  $|N_{k,l}^0/D_{k,l}^0|$ . Portanto, o problema de otimização é formulado

como

$$\begin{aligned}
 & \text{Encontrar} && B_c, D_c \\
 & \text{Minimizar} && |\zeta(B_c, D_c) - \zeta_0| + NSES + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^p |N_{k,l}^0 / D_{k,l}^0| \quad (18) \\
 & \text{Sujeito a} && b_c^{\min} \leq b_c \leq b_c^{\max}, d_c^{\min} \leq d_c \leq d_c^{\max}
 \end{aligned}$$

onde  $b_c$  e  $d_c$  são os elementos das matrizes  $B_c$  e  $D_c$  respectivamente, sujeitos a valores mínimo e máximo.

As variáveis do problema de otimização serão inicializadas assumindo todos os sinais disponíveis para serem entrada e saída do CCA. No decorrer de cada interação do método, as colunas e linhas de  $B_c$  e  $D_c$  associadas a determinado canal são zeradas. O critério de parada deste método é o número de iterações.

#### 4 | ESTUDOS DE CASOS

O método proposto foi avaliado no sistema IEEE 39 barras composto por 10 geradores síncronos e cujo ponto de operação nominal e todas as informações estão disponíveis em (CANIZARES et al., 2017). Um conjunto de 180 pontos de operação foi obtido através da variação de carga do sistema teste entre -10% e +10% e desconexão das linhas de transmissão. A Tabela 1 fornece mostra os modos de menores taxas de amortecimento para dois pontos de operação, o caso base (CB) disponível em (CANIZARES et al., 2017) e o caso C1 que consiste na redução do nível de carga do sistema teste em 10% e a remoção da transmissão 6-11. A Figura 1 apresenta os modos de menores taxas de amortecimento de todos os 180 pontos de operação.

Caso	Autovalores	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
CB	-0,4984 ± j3,6823	0,5861	13,413
C1	0,0118 ± j5,9464	0,9464	-0,198

Tabela 1. Modos de oscilação dominantes do sistema

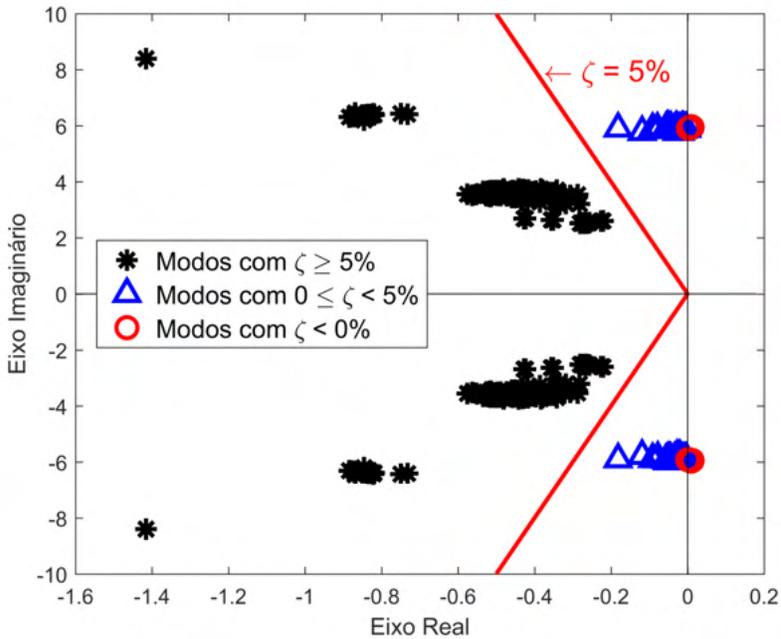


Figura 1. Modos de oscilação com baixas taxas de amortecimento dos 180 pontos de operação do sistema teste.

Assim, um CCA será projetado para garantir taxas de amortecimento superiores a 5% para todos os pontos de operação. O atraso de tempo será de 200 ms ( $T=0,200$ ). Os limites mínimo e máximo das variáveis são  $(b_c^{min}, b_c^{max})=(-1000,1000)$  e  $(d_c^{min}, d_c^{max})=(-10,10)$ . Os polos da matriz  $A_c$  são -10 e -10. A metaheurística Otimização por Enxame de Partículas foi implementada assumindo 10 partículas e 1000 iterações máximas. O método proposto foi simulado 1000 vezes para se avaliar os 1000 CCAs projetados. A Figura 2 apresenta um fluxograma com as taxas de amortecimento do sistema com cada um dos 1000 CCAs e a Figura 3 apresenta o número de sanais de entrada e saída de cada um dos 1000 CCAs.

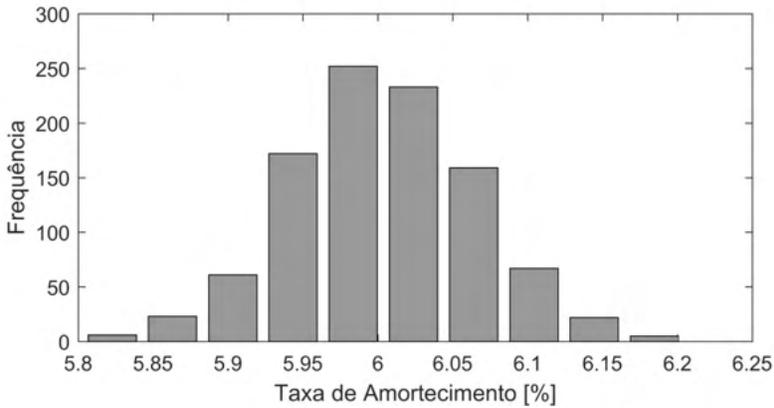


Figura 2. Histograma de amortecimento mínimo do sistema de malha fechada dos 1000 CCAs projetados

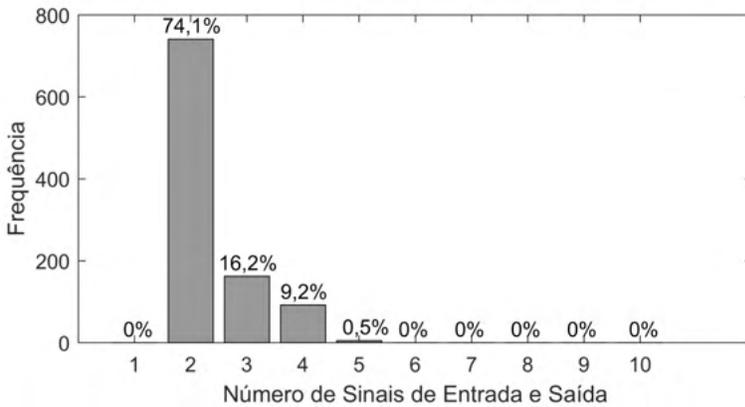


Figura 3. Número de sinais entrada-saída dos 1000 CCAs projetados.

O CCA com maior taxa de amortecimento mínimo e menor número de sinais de entrada e saída foi escolhido para simulações no domínio do tempo. Os parâmetros deste CCA estão presentes na Tabela 2. A Figura 4 apresenta os modos de oscilação de menores taxas de amortecimento de cada um dos 180 pontos de operação.

$w_{k,l}$	$N^e_{k,l}$	$N^i_{k,l}$	$N^o_{k,l}$	$D^i_{k,l}$	$D^o_{k,l}$
$w_{2,2}$	0,0514	22,8513	227,8300	20	100
$w_{2,5}$	5,8927	207,8145	1659,9	20	100
$w_{5,2}$	44,4918	1647,4	1887,6	20	100
$w_{5,5}$	-2,3788	-167,0131	-1512,8	20	100

Tabela 2. Parâmetros do Controlador Centralizado de Amortecimento.

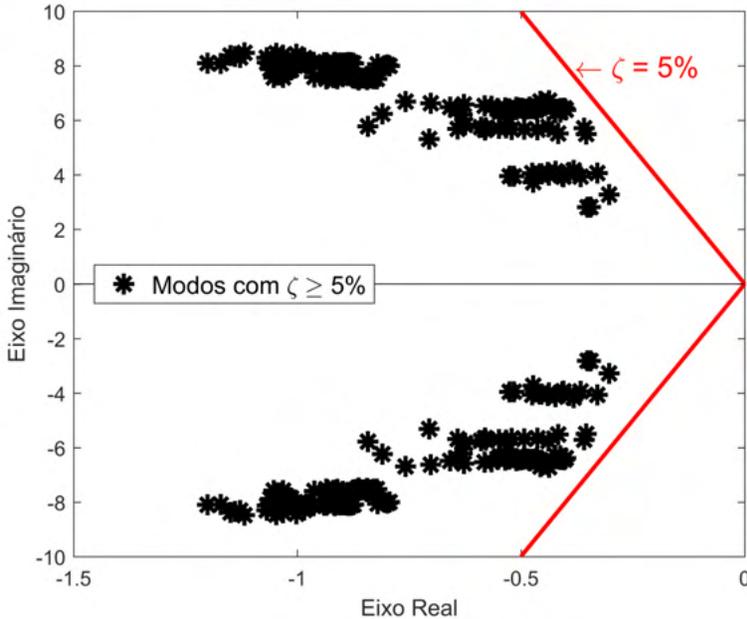


Figura 4. Modos de oscilação dominantes dos 180 pontos de operação com o controlador centralizado de amortecimento.

As simulações não lineares no domínio do tempo foram executadas considerando limitadores para o CCA projetado, para os ESPs e os Reguladores Automáticos de Tensão. Uma falta trifásica de 10 ms foi aplicado à barra 31. As Figuras 5 e 6 apresentam a resposta angular e o esforço de controle do gerador 2 para a condição de operação C1 respectivamente. As respostas são mais amortecidas para o sistema com o CCA projetado.

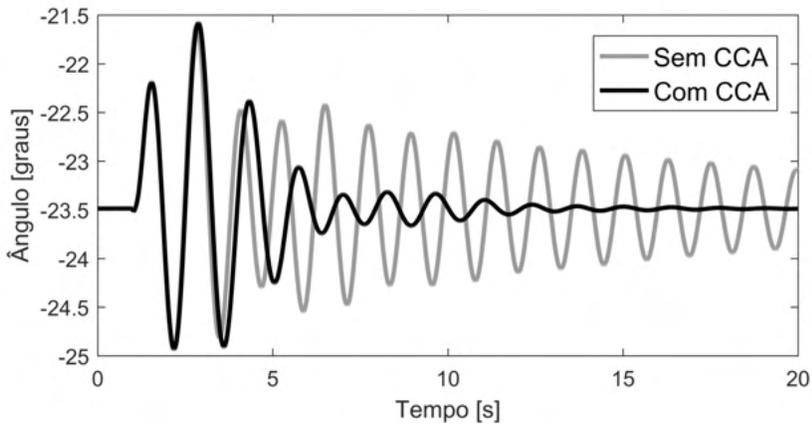


Figura 5. Resposta angular do gerador 2 para a condição de operação C1.

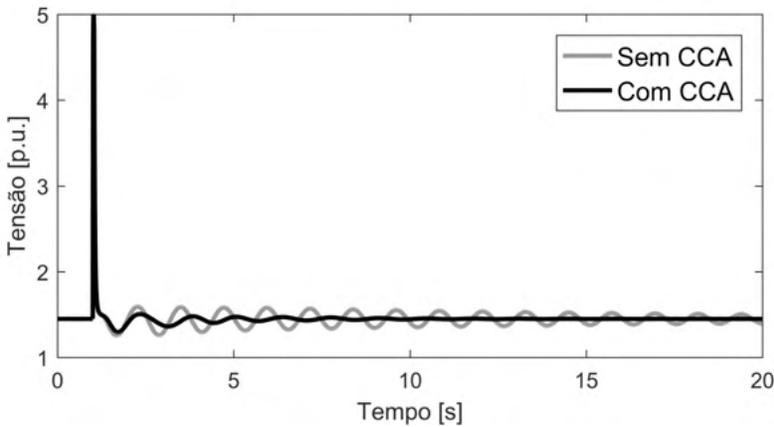


Figura 6. Tensão de campo do gerador 2 para a condição de operação C1.

Os resultados alcançados permitem as seguintes avaliações: (i) o método foi capaz de identificar 2 dentre 10 sinais disponíveis que seja suficiente em atender os requisitos desejados, (ii) um número reduzido de sinais conseguiu proporcionar altas taxas de amortecimento ao sistema teste, (iii) resultados de simulações dinâmicas evidenciam bom desempenho do controlador centralizado projetado modelos lineares de sistemas de potência.

## 5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de um método de projeto de controladores centralizados de amortecimento considerando uma minimização dos ganhos e do número de sinais de entrada e saída do controlador. Os resultados alcançados mostram a capacidade do método proposto em reduzir de 10 para 3, o número de sinais de entrada e saída. O

valor máximo do ganho em módulo foi de 12. Assim, o centro de operação pode focar seu sistema de segurança em valores reduzidos de canais de comunicação. Simulações do sistema sob contingência mostram resultados satisfatórios do desempenho do sistema de controle.

## REFERÊNCIAS

BENTO, M. E. C. **Fixed Low-Order Wide-Area Damping Controller Considering Time Delays and Power System Operation Uncertainties**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3918-3926, Sept. 2020.

CANIZARES, C. *et al.* **Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, Jan. 2017.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**, New York: McGraw-Hill, 1994.

TERZIJA, V. *et al.* **Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks**, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, Jan. 2011.

ZHANG, S.; VITTAL, V. **Design of Wide-Area Power System Damping Controllers Resilient to Communication Failures**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4292-4300, Nov. 2013.

ZHAO, Y. *et al.* **Resilient Adaptive Wide-Area Damping Control to Mitigate False Data Injection Attacks**, *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 4831-4842, Dec. 2021.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Adquisição de dados 41  
Amortecimento 84, 85, 87, 89, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100  
Ar 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 60  
Arma 1, 2, 4, 6, 9, 10, 11, 12  
Avaliação 6, 13, 27, 59, 67, 84, 89, 95, 119, 120, 123, 124

### C

Controladores 80, 92, 93, 100  
Controle 3, 6, 7, 8, 21, 24, 25, 40, 59, 68, 69, 70, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 93, 95, 99, 101, 118  
Conversor CC-CC Cuk 102, 104, 106, 111, 114  
Curso de graduação 117, 119

### D

Desvios vocais 1, 2  
Detecção 1, 2, 12, 13

### E

Emulador 102, 104, 105, 114  
Energias renováveis 57, 61, 65  
Ensino remoto 117, 118, 119, 120, 124, 126  
Estabilidade 65, 84, 85, 92, 105  
Expansão da geração de energia 56, 57, 65

### F

Fator de potência 68, 69, 73, 77, 80, 82

### I

Ímãs permanentes 68, 74, 78, 81, 82, 83

### J

Jogos digitais 15, 16, 18, 19, 25

### K

K-nearest neighbor 1, 2, 5

## **M**

Margem de carga 84, 85, 89, 90, 91

Metodologia avaliativa 117, 119

Metodologias ativas 15

Métodos diretos 84, 85

Modelagem computacional 27

Motor síncrono 68, 78, 82

## **O**

Otimização 13, 39, 58, 65, 84, 85, 86, 88, 91, 92, 93, 95, 96, 97

## **P**

Pandemia 59, 60, 117, 118, 120, 124, 126

Penetração do cordão de solda 40, 41

Pequenos sinais 68, 69, 72, 73, 82, 84, 92

Procesamento de imagen 41

Prototipagem virtual 27

## **R**

Realidade virtual 16, 27

Resistência 110, 121, 122

Robótica móvel 15

## **S**

Scratch 14, 15, 19, 20, 24, 25

Segurança dinâmica 84, 87, 89

Sistema elétrico brasileiro 56, 57, 58, 62

Sistemas multienergia 57, 65

## **T**

Tensão 68, 69, 70, 71, 73, 76, 78, 80, 81, 82, 84, 89, 99, 100, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 118

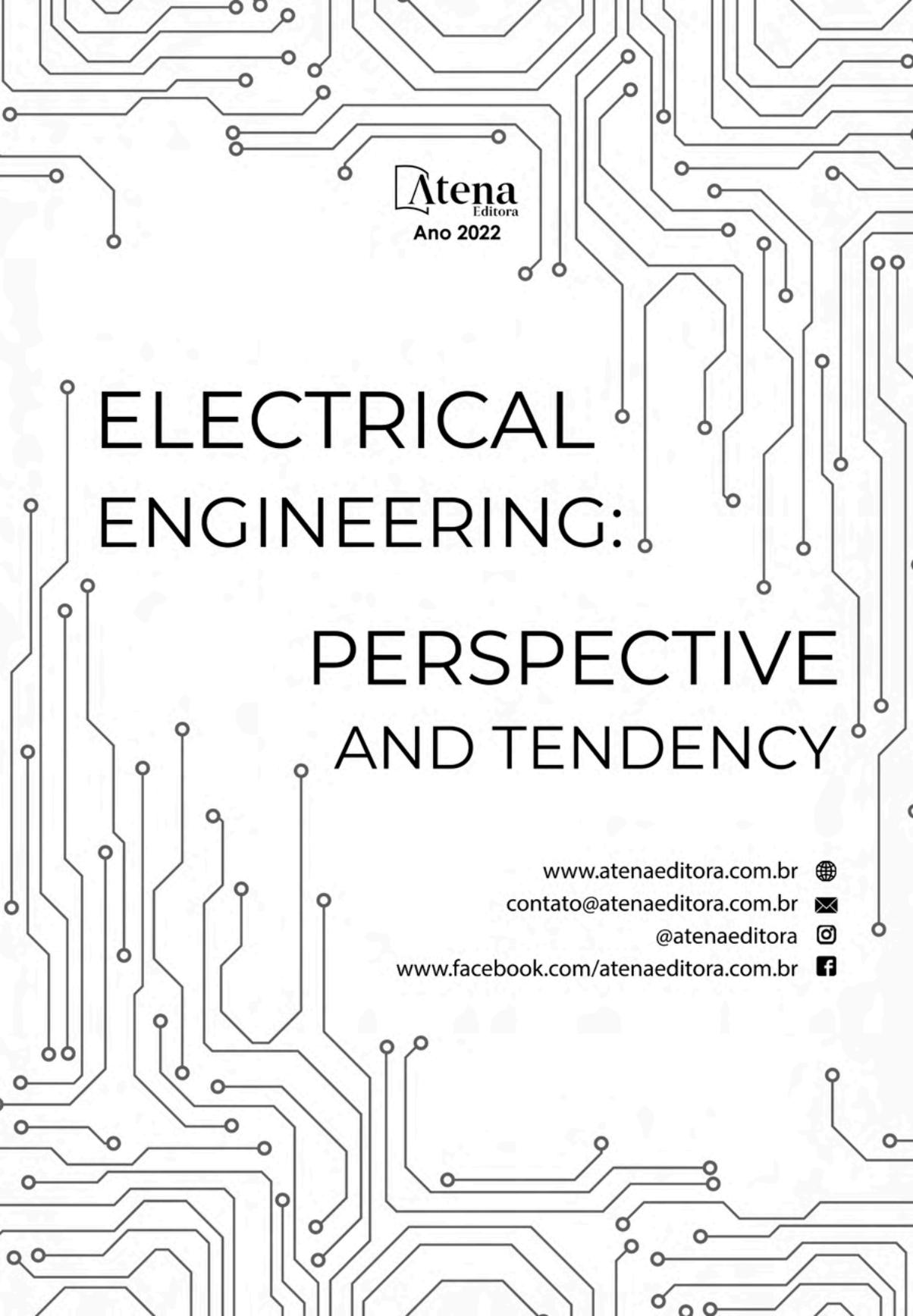
Termografia infravermelha 41

Traçador de curvas 102, 104, 108, 109, 110, 111, 114

Treinamento 9, 17, 27

## **U**

Unidade de medição fasorial 92

The background of the entire page is a white-to-light-gray gradient with a complex, black line-art pattern of a circuit board. The lines represent traces, pads, and vias, creating a dense, interconnected network that fills the space.

**Atena**  
Editora  
Ano 2022

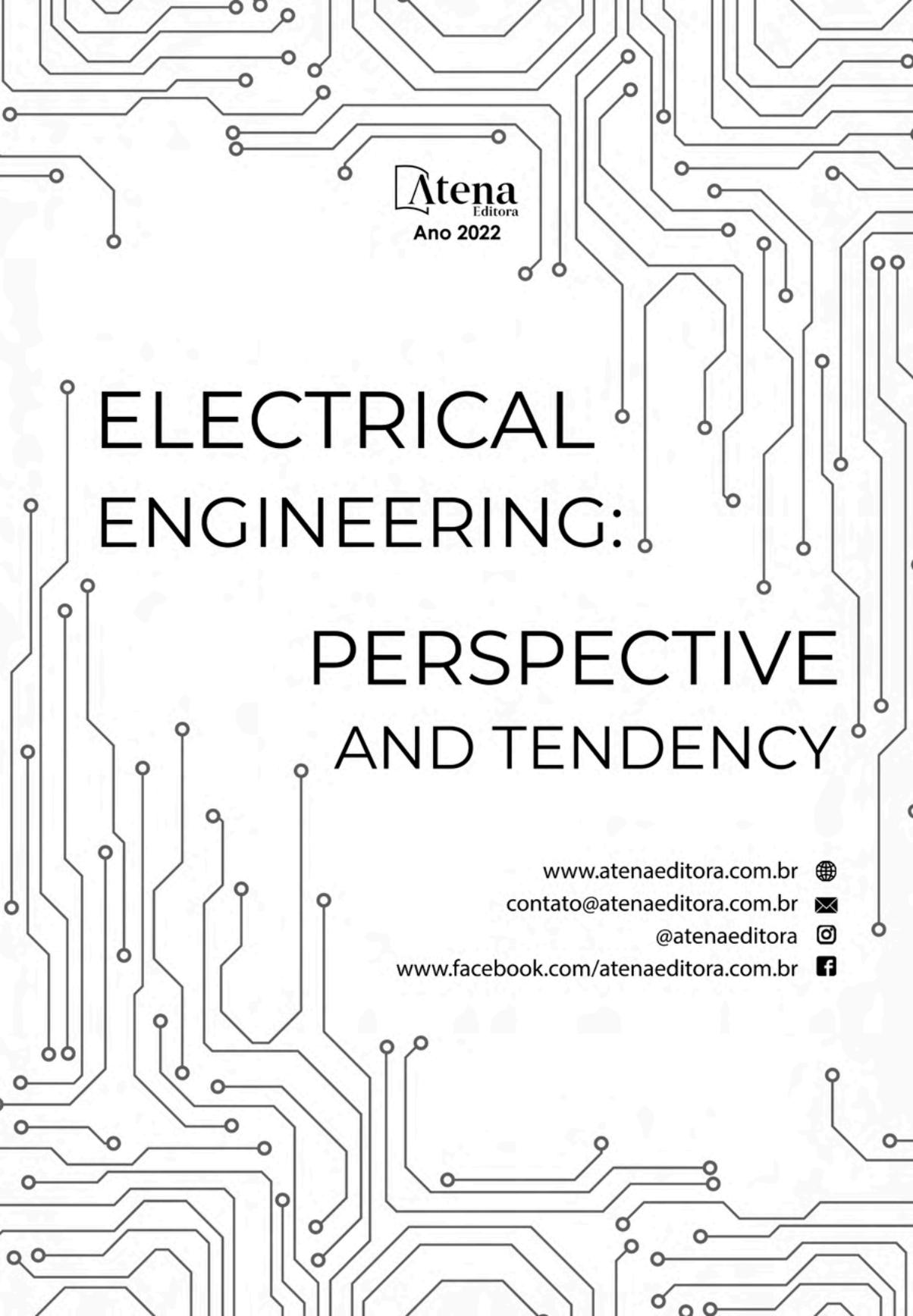
# ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

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

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

The background of the entire page is a white-to-light-gray gradient with a complex, black line-art pattern of a circuit board. The lines represent traces, pads, and vias, creating a dense, interconnected network that fills the space.

**Atena**  
Editora  
Ano 2022

# ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

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

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