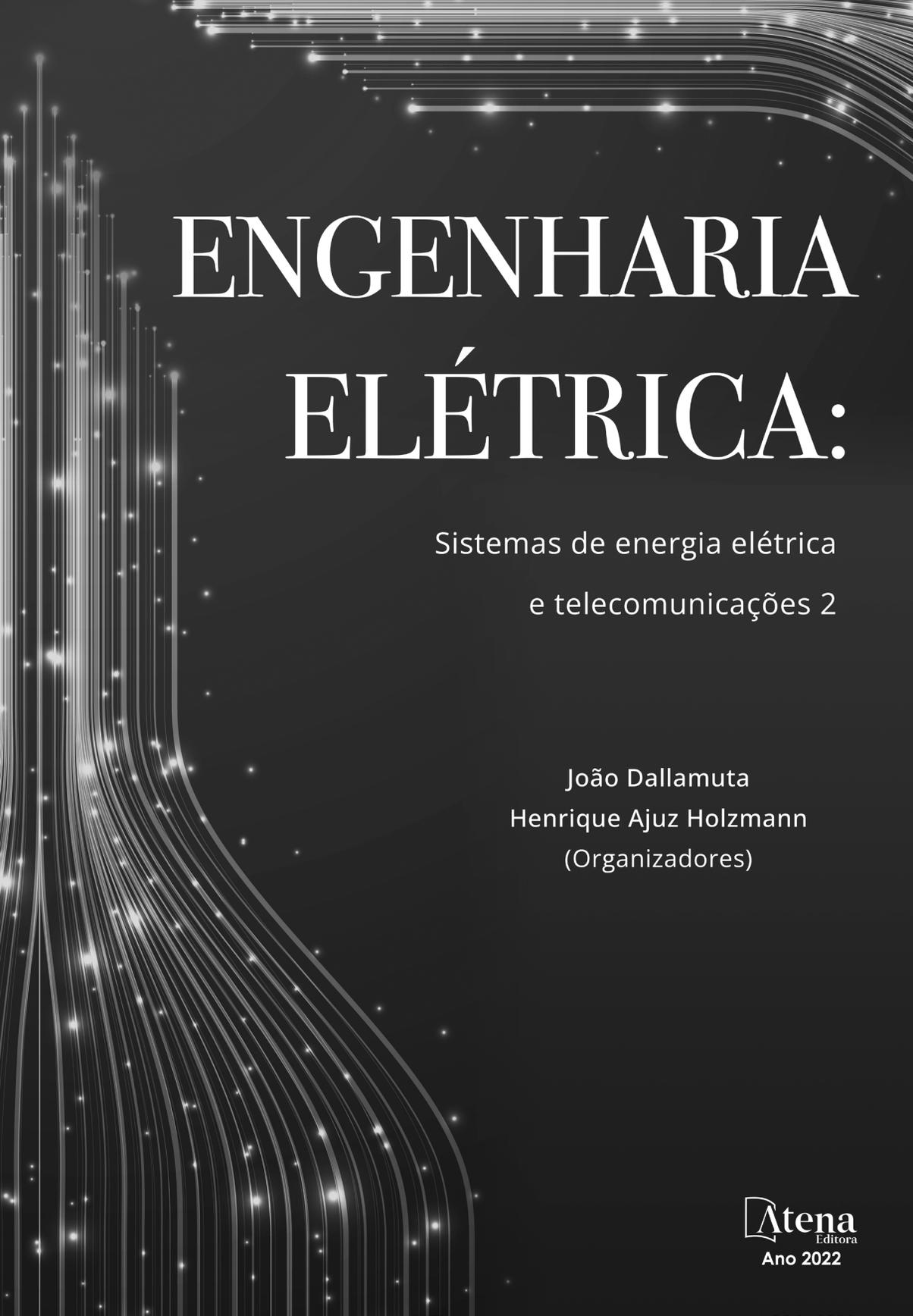


# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações 2

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)



# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações 2

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

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-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências 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

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof<sup>o</sup> 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

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> 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

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> 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

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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b>	
E57	<p>Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0727-0 DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111">https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111</a></p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Telecomunicações. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.3</p>
<b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 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.

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 eletricitista 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

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
ESTRATÉGIA TÉCNICA À IMPLANTAÇÃO FUNCIONAL DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE MODULAR	
Cíntia Veiga Claudio	
Fernanda Trindade	
Guilherme Ferretti Rissi	
Mateus Teixeira Duarte	
Massayuki Suzuki	
Nelson C. Jesus	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111</a>	
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>14</b>
PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR MODO DESLIZANTE APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK: ESTUDO DE CASO	
Rafael Angelini Donda	
Flávio Luiz Rossini	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112</a>	
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>25</b>
USO DE MICRORREDES FOTOVOLTAICAS. CASO DE ESTUDIO EXTENSIÓN LODANA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ	
María Rodríguez Gámez	
Antonio Vázquez Pérez	
Guillermo Antonio Loor Castillo	
Wilber Manuel Saltos Arauz	
Italo Humberto Navarrete García	
Marcos Lenin Davila Cedeño	
Lucio Alfredo Valarezo Molina	
Julio Cesar Mera Macias	
Julio Cesar Guamán Segarra	
Lenin Agustín Cuenca Álava	
Washington Colon Castillo Jurado	
José Ricardo Núñez Álvarez	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113</a>	
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>47</b>
ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA	
Henrique Coldebella	
Leandro Castilho Brolin	
Flávio Luiz Rossini	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114</a>	
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>59</b>
A INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DA SOLDA A ARCO	

**SUBMERSO EM CHAPAS FINAS**

Júlio Cezar Pedrosa da Silva  
 Gustavo de Castro Lopes  
 Matheus Abrão Abdala  
 Aldemi Coelho de Lima  
 Ildeu Lúcio Siqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211115>

**CAPÍTULO 6 .....72****ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO IFG - CAMPUS GOIÂNIA, A PARTIR DE *RETROFIT* DE ILUMINAÇÃO**

Berthiê de Castro Furtado  
 Aylton José Alves  
 André Mendes Martins  
 José Luis Domingos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211116>

**CAPÍTULO 7 .....87****DESCUBRIENDO LAS CÓNICAS A PARTIR DE SU ECUACIÓN GENERAL**

Esperanza Georgina Valdés y Medina  
 Miguel Ángel Chávez García  
 Leilani Medina Valdés

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211117>

**CAPÍTULO 8 ..... 91****APLICAÇÃO DO MÉTODO DO GRADIENTE E DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA**

Diego Carrião Canhan  
 Leandro Castilho Brolin  
 Flávio Luiz Rossini

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211118>

**CAPÍTULO 9 .....101****ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS EM EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS-MA**

Camila Pinho Tavares Coimbra  
 Jessica Moraes Dos Santos  
 Janyeid Karla Castro Sousa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211119>

**SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 111****ÍNDICE REMISSIVO .....112**

# ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **Henrique Coldebella**

Discente do Curso de Engenharia  
Eletrônica/DAELN. Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná, Campo  
Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 5427493624834560

### **Leandro Castilho Brolin**

Coorientador. Docente no Curso  
de Engenharia Eletrônica/DAELN.  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 7118655172023189

### **Flávio Luiz Rossini**

Orientador. Docente no Curso de  
Engenharia Eletrônica/DAELN.  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 8616413126997528

**RESUMO:** O presente artigo, propõem-se um estudo teórico direcionado a uma comparação entre os algoritmos de estimação paramétrica do Gradiente e dos Mínimos Quadrados Recursivos, aplicados ao projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência (do inglês “*Model Reference Adaptive Controller*” -

MRAC). Atualmente, na área de Controle e Automação, tornou-se essencial no ambiente fabril o conceito de Indústria 4.0. Neste contexto, há necessidade de uma maior precisão e capacidade de contornar mudanças de pontos de operação, erros por variação de parâmetros e falhas ou mesmo quebra de componentes. Uma alternativa para melhorar o desempenho desses processos emergem com as técnicas de controle adaptativo. Assim, a presente proposta tem como objetivo comparar alguns métodos de projeto e simulação de sistemas de controle adaptativo aplicado a plantas típicas, tal como servo posicionamento. O presente artigo teve como foco o controlador MRAC e seus mecanismos de adaptação. Dessa forma, o trabalho foi dividido em etapas, a seguir: implementaram-se o Método do Gradiente (MG) e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) no bloco de adaptação do controlador; Compararam-se os resultados simulados no *software* Matlab®; e Estabeleceu-se um modelo com parâmetros variantes de um servomotor CC para validar os algoritmos estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comparação entre

## ANALYSIS OF PARAMETRIC ESTIMATION ALGORITHMS APPLIED TO ADAPTIVE CONTROLLER DESIGN BY REFERENCE MODEL

**ABSTRACT:** This article proposes a theoretical study aimed at a comparison between the parametric estimation algorithms of the Gradient Method (GM) and the Recursive Least Squares (RLS), applied to the Model Reference Adaptive Controller project. Currently, in the area of Control and Automation, the concept of Industry 4.0 has become essential in the industrial environment. In this context, there is a need for greater precision and the ability to circumvent changes in operating points, errors due to parameter variation and failures or even breakage of components. An alternative to improve the performance of these processes emerges with adaptive control techniques. Thus, the present proposal aims to compare some methods of design and simulation of adaptive control systems applied to typical plants, such as servo positioning. This article focused on the MRAC controller and its adaptation mechanisms. Thus, the work was divided into stages, as follows: () the Gradient Method (MG) and the Recursive Least Squares Method (MMQR) were implemented in the adaptation block of the controller; The results simulated in the Matlab® software were compared; and () A model with variant parameters of a DC servomotor was established to validate the studied algorithms.

**KEYWORDS:** Comparison between RLS and GM. MRAC. Simulated Results.

## INTRODUÇÃO

O conceito de adaptação parte de uma ação em que se muda um determinado comportamento para se ajustar a novas condições. Da mesma forma, na indústria, existem processos ou plantas que estão sujeitas a alterações em seu comportamento dinâmico, seja por variação de seus parâmetros de operação ou erros imprevistos (ÄSTRÖM; WITTENMARK, 1995).

Neste contexto, deu-se início aos primeiros estudos direcionados a criação de um sistema de controle capaz de se ajustar continuamente às alterações dinâmicas no processo. Os primeiros controladores adaptativos surgiram na década de 1950, com o desenvolvimento de sistemas de piloto automático para aeronaves (GREGORY, 1959). Apesar disso, foi durante as décadas de 1970 e 1980, quando a base teórica de estabilidade foi provada com argumentos matemáticos sólidos, que os primeiros controladores adaptativos comerciais surgiram no mercado (LANDAU; LOZANO; MŠSAAD; KARIMI, 2011).

A principal inovação dos sistemas de controle adaptativo é a possibilidade de modificar os ganhos do controlador de forma que sejam atendidas as especificações do sistema de controle, ajusta-se o comportamento do sistema conforme as alterações paramétricas da planta (ÄSTRÖM; WITTENMARK, 1995) (ROSSINI, 2020).

Portanto, o presente artigo focou no projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência (do inglês “*Model Reference Adaptive Controller*” - MRAC). Esse tipo de

controlador contém um modelo que representa as especificações de desempenho para o processo a ser controlado, e um mecanismo para realizar o ajuste dos ganhos do controlador de forma recursiva (IOANNOU; SUN, 1996) (ROSSINI, 2020). Compararam-se os desempenhos do MRAC, a partir do uso de algoritmos de estimação distintos, o Método do Gradiente (MG), e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR).

Dessa forma, realizou-se um estudo teórico direcionado ao desenvolvimento matemático e a implementação dos códigos de cada algoritmo, bem como a validação dos mecanismos modelados ao serem submetidos a um processo variante no tempo. Para isso, utilizou-se a ferramenta MATLAB® para conduzir as devidas implementações e simulações dos controladores estudados.

## CONTROLE ADAPTATIVO

Nesta seção, serão apresentados os principais referenciais teóricos para o desenvolvimento deste artigo. Com base nos principais autores da área de controle adaptativo, será apresentado o conceito base para o projeto de MRAC, bem como serão demonstrados os algoritmos matemáticos para a implementação do mecanismo de adaptação.

## CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Proposto inicialmente por Whitaker et al. (1958), o sistema MRAC, tem como objetivo regular o processo a ser controlado de forma a se obter um comportamento dinâmico próximo ao do modelo de referência pré-estabelecido no projeto. O modelo de referência  $F_m(s)$  descreve o comportamento esperado em malha fechada do sistema de controle (ÅSTROM; WITTENMARK, 1995).

Para que sejam ajustados os ganhos do controlador, implementa-se um mecanismo de adaptação, ou algoritmo de adaptação paramétrica. Esse algoritmo disponibiliza os respectivos sinais para realimentar o controlador com os parâmetros de ganho  $\hat{\vartheta}(t)$ , os quais são estimados com base na variação entre a resposta de saída do sistema  $y(t)$  e a saída do modelo de referência  $y_m(t)$  (GARCIA, 2019).

Assim, o mecanismo de adaptação recebe como entrada a saída do controlador  $u(t)$  e o valor do erro local  $\tilde{y}(t)$ , descrito por:

$$\tilde{y}(t) = y(t) - y_m(t) \tag{1}$$

O mecanismo tem como saída, portanto, um vetor de parâmetros estimados do controlador  $\hat{\vartheta}(t)$ . Na Figura 1, ilustra-se um diagrama de blocos típico do MRAC.

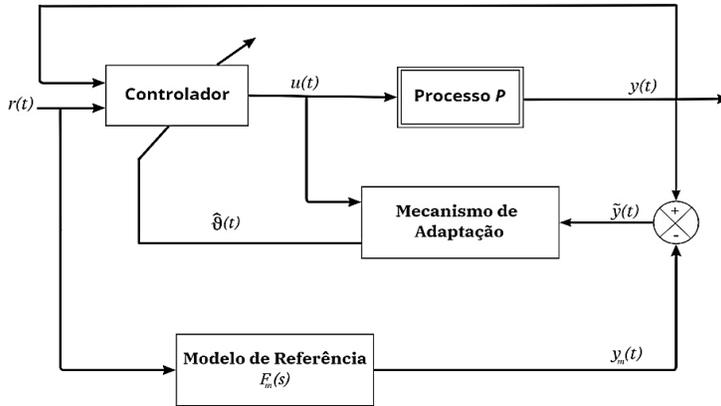


Figura 1 - Diagrama de Blocos de um MRAC  
 Fonte: Adaptado de (IOANNOU; SUN, 1996).

A lei de controle  $u(t)$  pode ser expressa da forma:

$$u(t) = \hat{\theta}^T \omega(t) \quad (2)$$

sendo  $\omega(t)$  o vetor de regressores do sistema.

O modelo apresentado na Figura 1 demonstra a importância do mecanismo de adaptação dentro de um sistema MRAC. Logo, para desempenhar a função de lei de controle e fornecer os ganhos do controlador, existem diferentes abordagens, tais como o MG e o MMQR.

## MÉTODOS DO GRADIENTE DE ADAPTAÇÃO PARAMÉTRICA

Desenvolvido no *Draper Laboratory* do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (do inglês “*Massachusetts Institute of Technology*” - MIT), o Método do Gradiente (MG) é um dos métodos de estimação paramétrica em projeto de MRAC, devido sua origem, encontra-se em algumas bibliografias como a Regra do MIT (do inglês “*MIT Rule*”).

O mecanismo de adaptação utiliza o MG e tem como objetivo minimizar a função custo  $J(\hat{\theta})$ , da forma:

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \tilde{y}(t) \quad (3)$$

Dessa forma, para que  $J$  seja mínimo, modifica-se o vetor de parâmetros  $\hat{\theta}$  na direção a um gradiente negativo de  $J$ , de tal forma que a variação dos parâmetros  $\hat{\theta}$  equivale a uma derivada parcial de  $J$  em função de  $\hat{\theta}$ , da forma:

$$\frac{d \hat{\theta}}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} \quad (4)$$

sendo  $\gamma$  um fator de ganho arbitrário para o projeto.

Assim, ao substituir a derivada parcial de  $J$  na Eq. (4), obtém-se:

$$\frac{d \hat{\theta}}{dt} = -\gamma \tilde{y} \frac{\partial \tilde{y}}{\partial \hat{\theta}} \quad (5)$$

Portanto a Eq. (5) representa a lei adaptativa do MG.

Considerou-se a função de transferência de uma planta  $P(s)$  de ordem  $n$ , escrita como:

$$P(s) = k_p \frac{Num_p(s)}{Den_p(s)} \quad (6)$$

Segundo Åström e Wittenmark (1995) para o projeto de MRAC, o conhecimento dos polinômios do processo  $P(s)$  não são necessários para a estimação dos parâmetros do controlador  $\hat{\theta}$ , dessa forma, estabeleceu-se um modelo de referência estável, da forma:

$$F(s) = k_m \frac{Num_m(s)}{Den_m(s)} \quad (7)$$

A diferença entre o número de raízes do polinômio do numerador e do polinômio do denominador indica o grau relativo  $n^*$  da planta.

Assim, para processos de ordem  $n$  e  $n^*=1$ , usou-se o vetor de regressores  $\omega$  para realizar a estimação dos parâmetros  $\hat{\theta}$ .

$$\frac{d \hat{\theta}}{dt} = -\gamma \tilde{y}(t) \omega(t) \quad (8)$$

com  $\omega = [\omega_1^T; \omega_2^T; y, r]^T$ , sendo  $\omega_1, \omega_2, y, r$  os regressores dos parâmetros da lei de controle.

Utilizou-se um filtro auxiliar  $\phi(t)$ , o qual executa a filtragem do vetor de regressores  $\omega(t)$  pelo modelo de referência  $F_m(s)$ , expressado por:

$$\phi(t) = F_m(s) \mathbf{I} \omega(t) \quad (9)$$

E substituiu-se o valor de erro da Eq. (1) pelo erro de estimação na forma:

$$E_1(t) = \tilde{y}(t) + \hat{\theta}^T(t) \phi(t) - F_m(s) u(t) \quad (10)$$

Portanto, de forma mais abrangente, seja para processos de ordem  $n$  e grau relativo  $n \geq 1$ , a lei adaptativa do MG pode ser reescrita da forma (IOANNOU; SUN, 1996)

$$\frac{d \hat{\theta}}{dt} = -\gamma \frac{\phi(t) E_1(t)}{1 + \phi(t) \phi^T(t)} \quad (11)$$

## MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO DE ADAPTAÇÃO PARAMÉTRICA

A lei de estimação de parâmetros MMQR é caracterizada por possui uma matriz de covariância  $\mathbf{P}$ , essa determina a velocidade de adaptação dos parâmetros em função do tempo ou amostras. Assim, torna-se possível acelerar o processo de estimação no período

transitório ao inicializar a matriz  $\mathbf{P}$  com um valor suficientemente alto (IOANNOU; SUN, 1996).

O MMQR tem como o objetivo minimizar a função de custo do erro quadrático, expressada por:

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \int_0^t E_1^2(\tau) d\tau \quad (12)$$

Segundo Aguirre (2007), um modelo de lei adaptativa MMQR pode ser definida como:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -\mathbf{P}(t) \frac{\phi(t)E_1(t)}{1 + \phi(t)\phi^T(t)} \quad (13)$$

sendo  $\phi(t)$  expresso pela Eq. (9),  $E_1(t)$  expresso pela Eq. (10) e a matriz de covariância  $\mathbf{P}(t)$  é atualizada a partir das equações diferenciais matriciais:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -\frac{\mathbf{P}(t)\phi(t)\phi^T(t)\mathbf{P}(t)}{1 + \phi(t)\phi^T(t)} \quad (14)$$

sendo  $[1 + \phi(t)\phi^T(t)]$  um sinal de normalização, cuja função é garantir que a derivada seja sempre negativa.

## DISCRETIZAÇÃO

Para a implementação digital das leis adaptativas descritas na seção anterior, usam-se métodos numéricos para discretizar as derivadas paramétricas. O método escolhido para discretização das equações de tempo contínuo foi o Método de Euler. Este método propõe a substituição da derivada instantânea no tempo contínuo por uma aproximação em tempo discreto, descrita como:

$$\frac{dx(t)}{dt} \cong \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (15)$$

sendo  $x(t)$  um sinal com amostragem  $T$  para  $k$  amostras.

A derivada deste sinal no tempo representa a variação do mesmo entre uma amostra seguinte e a atual, dividido pelo tempo amostrado.

Ao aplicar a Transformada de Laplace em ambos os lados da Eq. (15), obtém-se a seguinte representação no domínio da frequência:

$$sY(s) = Y(s) \left[ \frac{e^{sT} - 1}{T} \right] \quad (16)$$

sendo  $z = e^{sT}$ , torna-se possível obter uma relação de  $s$  no domínio da Transformada Z que define o Método de Euler, descrito por:

$$s = \frac{z - 1}{T} \quad (17)$$

## METODOLOGIA

A implementação digital das leis adaptativas do MG e do MMQR foi realizada com o uso do Método de Euler descrito na subseção anterior. Dessa forma, utilizou-se a Eq. (17) como método de discretização para se obter as leis adaptativas do MG e do MMQR no tempo discreto. A Eq. (11) do MG foi discretizada e expressada como:

$$\hat{\vartheta}(k+1) = \hat{\vartheta}(k) - \gamma \frac{T\phi(k)E_1(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (18)$$

Da mesma forma foi aplicado o Método de Euler para discretizar as derivadas do MMQR, a forma discreta da Eq. (13) da forma:

$$\hat{\vartheta}(k+1) = \hat{\vartheta}(k) - \mathbf{P}(k) \frac{T\phi(k)E_1(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (19)$$

sendo que a matriz de covariância no tempo discreto  $\mathbf{P}(k)$  discretizada e reescrita por:

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k) - \frac{\mathbf{P}(k)\phi(k)\phi^T(k)\mathbf{P}(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (20)$$

## MODELO DE MOTOR CC

Para validar os algoritmos estudados no decorrer desse artigo, foi escolhida uma planta de segunda ordem de um servomotor de corrente contínua. O motor de corrente contínua é constituído de uma armadura e enrolamentos de campo. Para modelar o motor CC foi feita a aproximação segundo um circuito equivalente, que descreve os componentes de armadura do motor. Esse circuito equivalente é representado na Figura 2.

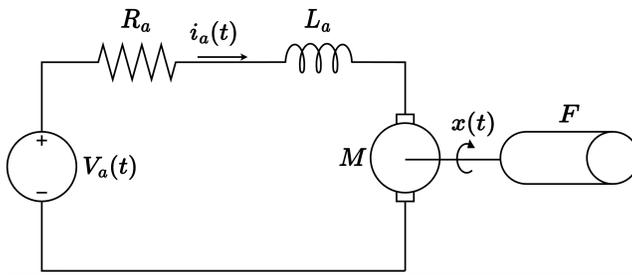


Figura 2 - Circuito Equivalente do Modelo do Motor CC

Fonte: Adaptado de (CANAL; VALDIERO; REIMBOLD, 2017).

A planta foi modelada com base nos parâmetros elétricos resistência, tensão, corrente e indutância de armadura,  $R_a$ ,  $V_a(t)$ ,  $i_a(t)$  e  $L_a$  respectivamente, e parâmetros mecânicos e eletromecânicos, como o motor CC  $M$  e os valores de energia mecânica  $F$  e a

velocidade angular  $x(t)$  (CANAL; VALDIERO; REIMBOLD, 2017).

O modelo representado na Figura 2 foi descrito a partir da equação do movimento, da forma:

$$F \frac{dx}{dt} = -bx(t) + T_F \quad (21)$$

sendo  $T_F = k_f \cdot i_a$ , com  $k_f$  representado como a constante de proporcionalidade de força, e  $b$  o torque em  $N \cdot m$ , reescreveu-se a Eq. (21) como:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{b}{F}x(t) + \frac{k_f}{F}i_a \quad (22)$$

Assim, analisou-se o circuito elétrico através do somatório das tensões da Figura 2, dessa forma obteve-se a seguinte equação de malha:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + V_M - V_a = 0 \quad (23)$$

sendo  $V_M = k_e \cdot x(t)$ , que corresponde a tensão eletromotriz do motor CC.

A Eq. (23) foi reescrita em função da derivada da corrente de armadura do motor, na forma:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a}i_a(t) - \frac{k_e}{L_a}x(t) + \frac{1}{L_a}V_a \quad (24)$$

Portanto, o modelo utilizado em espaço de estados das Eq. (22) e (24), pode ser reescrito da forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{i}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b/F & k_f/F \\ -k_e/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} \cdot V_a \quad (25)$$

sendo  $k_f = k_e = k$ .

Para o modelo, projetaram-se duas versões de um controlador MRAC, um que utiliza o MG e o outro MMQR, como leis de adaptação.

## RESULTADOS

Com o modelo de servomotor CC descrito em espaços de estados pela Eq. (25), adotaram-se os seguintes parâmetros variantes no tempo para validação dos algoritmos de adaptação paramétrica, conforme a Tabela 1:

tempo [s]	$F [Kg \cdot m^2/s^2]$	$b [N \cdot m]$	$k$	$R_a [\Omega]$	$L_a [H]$	$V_a [V]$
$0 < t < 400$	0,01	0,1	0,01	1	0,5	12
$t \geq 400$	0,01	0,1	0,01	1	1	9

Tabela 1 - Parâmetros Variantes no Modelo de Motor CC

Fonte: Autoria Própria (2022).

Realizou-se a implementação de ambos os modelos no ambiente MATLAB®, com a finalidade de se controlar a velocidade angular  $x(t)$  do motor CC.

Os modelos foram convertidos em uma função de transferência e em seguida discretizados para simulação. Para o projeto de um MRAC não é necessário o conhecimento dos parâmetros da planta, sendo estes utilizados apenas com a finalidade de gerar a simulação.

Para o modelo de referência  $F_m(s)$  foi adotado uma função de transferência de segunda ordem de forma que seja possível obter uma saída com 7% de percentual de sobressinal e 3 segundos de tempo de subida, dessa forma o modelo de referência no domínio  $s$ :

$$F_m(s) = \frac{1,882}{s^2 + 1,773s + 1,882} \quad (26)$$

## SIMULAÇÃO DO MRAC-MG

Para o MRAC com a lei adaptativa do MG representada no tempo discreto pela Eq. (18). Foi escolhido um fator de ganho adaptativo  $\gamma=25$  e uma taxa de amostragem de  $T=0,01$  s, valor este selecionado através de uma bateria de testes em busca de um fator de ganho suficiente para que a saída se aproxime rapidamente do modelo de referência adotado.

Na Figura 3, ilustra-se em (a) a relação entre o sinal de referência  $r(t)$  e o modelo de referência  $y_m(t)$  da Eq. (26), (b) a evolução dos parâmetros  $\hat{\theta}(t)$  do controlador no tempo e (c) a saída controlada da planta  $y(t)$  em malha fechada com o MRAC-MG.

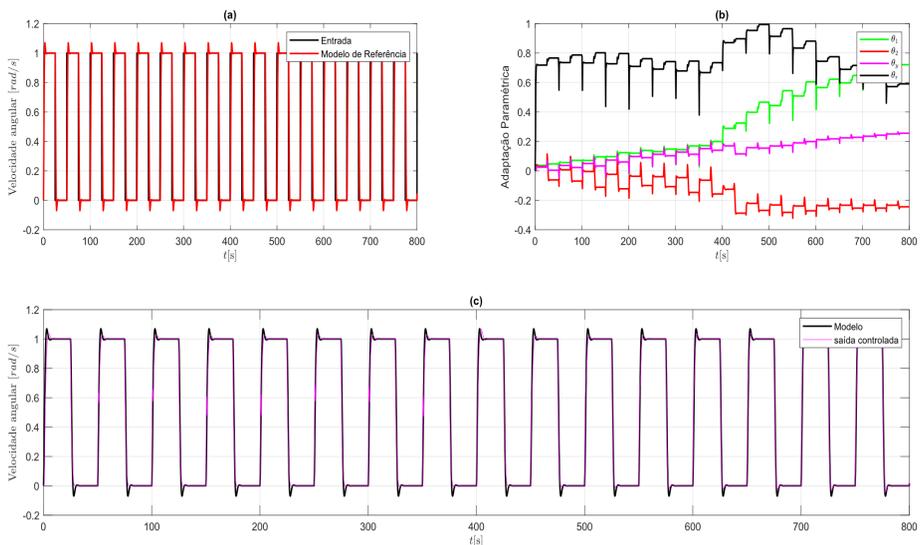


Figura 3 - Desempenho conforme a Lei Adaptativa do Gradiente

Fonte: Autoria Própria (2022).

Foi analisado o custo computacional na execução do laço recursivo na simulação de ambos os controladores, para um total de 500.000 pontos, a execução da simulação do MRAC com a lei adaptativa do MG demorou cerca de 1,6056 segundos.

## SIMULAÇÃO DO MRAC-MMQR

Para o projeto do MRAC baseado na lei adaptativa do MMQR, representado na forma discreta pela Eq. (19) e a matriz de covariância  $\mathbf{P}$ , implementou-se no tempo discreto conforme a Eq. (20), com inicialização da forma  $\mathbf{P}(0)=P_0\mathbf{I}$  com  $P_0=100$ . O valor de  $P_0$  define a velocidade em que os parâmetros do controlador serão ajustados e foi escolhido com base em uma bateria de testes de desempenho.

Na Figura 4, ilustrou-se em (a) a relação entre o sinal de referência  $r(t)$  e o modelo de referência  $y_m(t)$  da Eq. (26), (b) a evolução dos parâmetros  $\hat{\theta}(t)$  do controlador no tempo e (c) a saída controlada da planta  $y(t)$  em malha fechada com o MRAC-MQR.

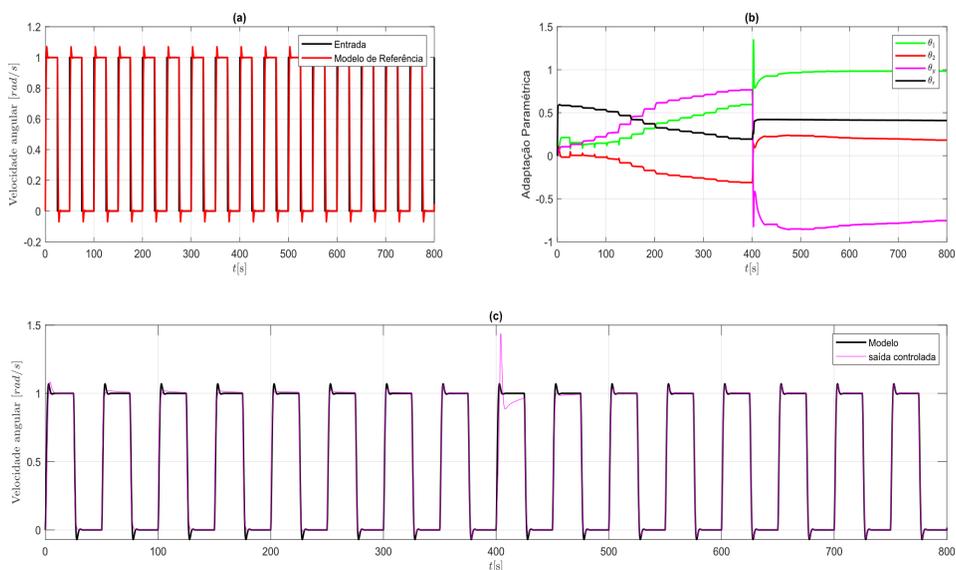


Figura 4 - Desempenho conforme a lei adaptativa MQR

Fonte: Autoria Própria (2022).

A simulação do MRAC com a lei adaptativa do MMQR teve um tempo de execução de cerca de 7,6615 segundos.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foram (i) implementados os algoritmos matemáticos do MG e do MMQR como mecanismo de adaptação do MRAC, e (ii) comparados com o uso do ambiente MATLAB®. A validação dos códigos ocorreu com a (iii) modelagem de um

servomotor CC, que foi utilizado como planta de parâmetros variantes para demonstrar o desempenho dos controladores projetados.

Com base nos resultados obtidos, notou-se que o MRAC-MG possui menor custo computacional, conseqüentemente menor tempo de execução, no entanto, o controlador demorou mais tempo para alcançar o modelo de referência estabelecido, em que esse apresentou uma adaptação de parâmetros com oscilação.

A lei adaptativa do MMQR, por outro lado, demandou maior tempo de execução, mas possui um desempenho menos oscilatório, quando comparado ao MRAC-MG. A inicialização da matriz de covariância com um número elevado implicou em uma maior velocidade de adaptação paramétrica. Dessa forma, essa lei adaptativa alcançou um resultado mais preciso em relação ao modelo de referência, com maior velocidade de adaptação e uma curva de adaptação de parâmetros mais suave.

Ambos os controladores projetados obtiveram bom desempenho quanto a alteração nos parâmetros da planta, dessa forma, constatou-se a eficácia do controle adaptativo ao ser submetido a processos variantes no tempo.

Em trabalhos futuros espera-se que seja possível implementar os algoritmos, nestes apresentados e simulados, em um microcontrolador ou sistema embarcado e implementados em uma planta real com parâmetros variantes reais.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela estrutura e licenças de *software* que permitiu a devida execução do presente artigo.

Ao Prof. Dr. Flávio Luiz Rossini pela orientação na presente pesquisa e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Prof. Dr. Leandro Castilho Brolin pelo apoio e compreensão durante a execução desta pesquisa.

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares**. [S.l.]: Editora UFMG – 3ª Edição, 2007.

ÅSTRÖM, K. J., WITTENMARK, B. **Adaptive Control**, Second Edition. Addison-Wesley, 1995.

CANAL, I. P., VALDIERO, A. C., REIMBOLD, M. M. P.; **Modelagem Matemática de Motor de Corrente Contínua e Análise Dinâmica**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Vol. 5, N. 1. 2017.

GARCIA, C.; **Controle de Processos Industriais: Estratégias Modernas** (Volume 2). Blucher; 1ª edição. 1 de dezembro 2019. 245-276.

GREGORY, P.; **Self adaptive flight control**. Flight Control Symposium. 1959.

IOANNOU, P. A.; SUN, J. **Robust Adaptive Control**. Editado por PTR Prentice-Hall. 1996.

LANDAU, I. D.; LOZANO, R.; MŠSAAD, M.; KARIMI, A. **Adaptive control: algorithms, analysis and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

ROSSINI, Flávio Luiz. **Métodos de Filtragem, Estimação e Controle Adaptativo Indireto Aplicados a Sistemas de Teleoperação Bilateral**. pt. PhD thesis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação—Universidade Estadual de Campinas, 2020.

WHITAKER, H. P., YAMRON, J., KEZER, A.; **Design of model-reference adaptive control systems for aircraft**. Massachusetts Institute of Technology, Instrumentation Laboratory. 1958.

**A**

Arco submerso 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 71

**C**

Chapas finas 59, 61

Comparação 5, 23, 47, 91, 98

Comparação de desempenho 91

Compensação reativa série 1, 3, 11, 13

Construção civil 101, 102, 103, 104, 105, 109, 110

Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR) 49, 91, 93, 100

Controle por modo deslizante 14, 16, 23

Conversor CC-CC buck 14, 16, 17

Curto circuito 1, 12, 13

**D**

Demanda energética 26

Desarrollo local 26

Destinação 101, 102, 103, 107, 108

Distorções harmônicas 72, 73, 75, 76, 81, 82

**E**

Energía fotovoltaica 26, 29, 41, 42, 45

**G**

Generación distribuida 26, 30, 39, 40, 42, 43, 45, 46

GeoGebra 87, 88, 89, 90

Geração 12, 73, 77, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 109

Gerenciamento 75, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110

**I**

Impactos ambientais 101, 102

Interpretación 87, 89

**M**

Método do Gradiente (MG) 47, 49, 50, 91, 96

Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) 47, 49, 51, 91, 97

MG 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 91, 92, 96, 97, 98, 99

MMQR 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 91, 92, 97, 98, 99

## **P**

Partícula magnética 59, 62, 63, 68, 69, 70

Planejamento 1, 13, 107, 108, 109

Potência de 1, 11, 79

## **Q**

Qualidade da solda 59, 60, 61, 62

Qualidade de energia 1, 72, 73, 75, 77, 84

## **R**

Resíduos 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110

Ressonância subsíncrona 1, 3, 7, 11

Resultados simulados 47, 48

Retrofit de iluminação 72, 73, 80

## **S**

Secciones cónicas 87, 88, 89

Sistema não linear 14

Sostenibilidad 26, 27, 28, 45

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações 2

[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) 

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações 2

[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) 