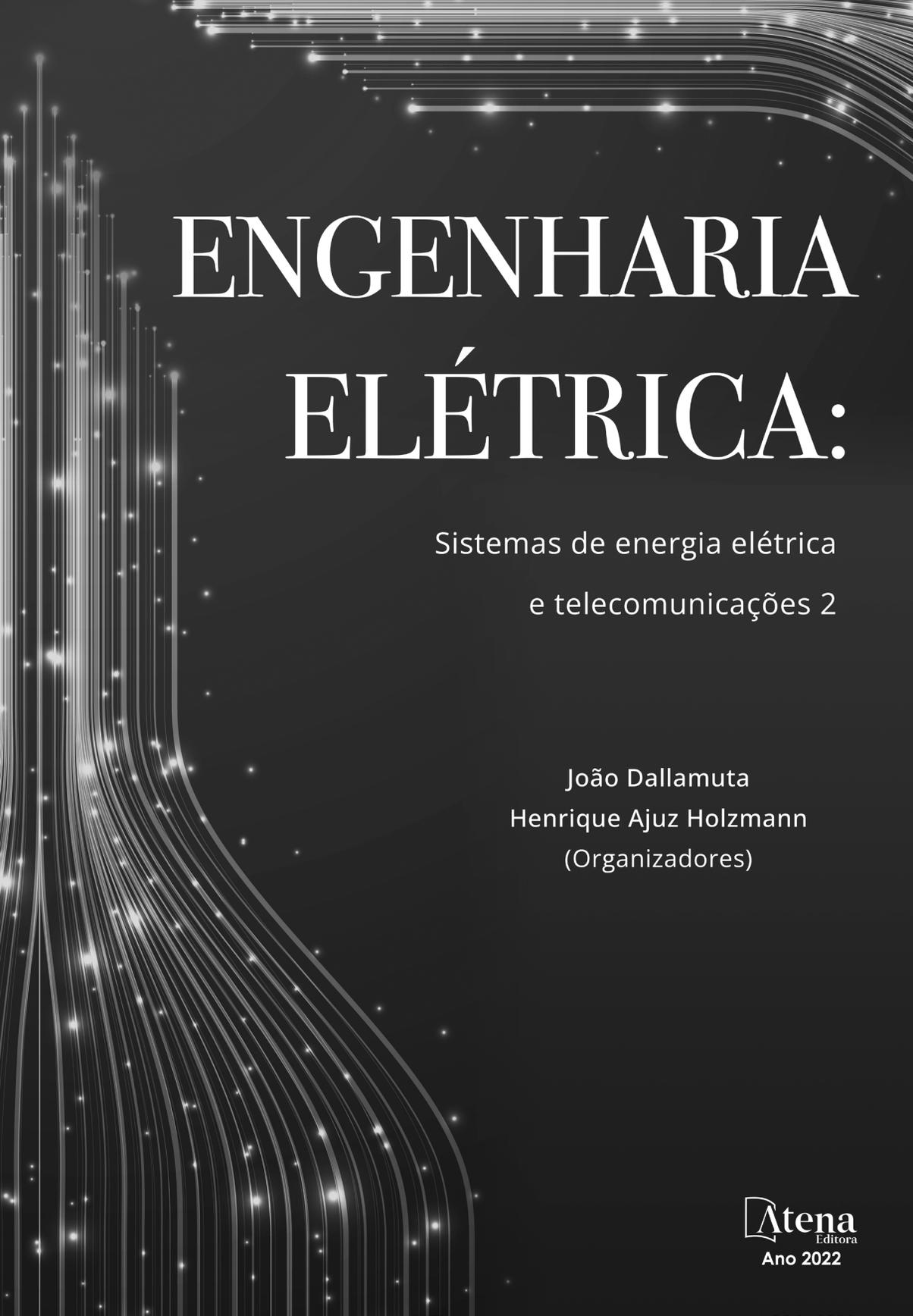


ENGENHARIA ELÉTRICA:

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^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

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

Prof^o 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^o Dr^a 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^o Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof^o Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof^o Dr^a 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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
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: https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111</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>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

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

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 eletricista 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

CAPÍTULO 1	1
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	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111	
CAPÍTULO 2	14
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	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112	
CAPÍTULO 3	25
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	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113	
CAPÍTULO 4	47
ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA	
Henrique Coldebella	
Leandro Castilho Brolin	
Flávio Luiz Rossini	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114	
CAPÍTULO 5	59
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 672**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 787**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 9101**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 REMISSIVO112**

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO GRADIENTE E DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Data de aceite: 01/11/2022

Diego Carrião Canhan

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

Leandro Castilho Brolin

Docente no Curso de Engenharia Eletrônica/DAELN. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil
ID Lattes: 71186655172023189

Flávio Luiz Rossini

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

RESUMO: O presente trabalho realizou a comparação de desempenho entre dois algoritmos de estimação paramétrica, o Método do Gradiente (MG) e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR), ambos aplicados ao sistema de Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR). O estudo de técnicas de análise e projeto de controle, assim como a comparação dos métodos aqui apresentados, potencializam a capacidade

do projetista em lidar com problemas práticos de forma eficaz. A principal contribuição do artigo foi reproduzir e esclarecer as vantagens dos métodos abordados. Assim, os objetivos específicos foram: (i) Identificar a planta a controlar; (ii) discretizar a planta; (iii) Construir a lei de controle; (iv) Implementar o algoritmo de identificação; e (v) Validar os resultados. A partir de simulações numéricas, analisou-se o desempenho de cada algoritmo e suas características. O MMQR possui ótimo regime transitório, mas um custo computacional elevado. O MG possui o tempo de acomodação mais lento, quando comparado ao MMQR, contudo tem baixa demanda computacional. Ao levar em consideração as características de cada algoritmo, ter conhecimento prévio sobre a planta que se deseja controlar, auxilia na escolha do algoritmo que mais se adequa as necessidades, assim potencializa melhor desempenho do sistema de controle.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR). Método do Gradiente (MG). Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR). Comparação de Desempenho.

ABSTRACT: The present work carried out a performance comparison between two parametric estimation algorithms, the Recursive Least Squares Method (RLSM) and the Gradient Method (GM), both applied to the Model Reference Adaptive Control (MRAC). The study of analysis techniques and control design, as well as the comparison of the methods presented here, enhance the designer's ability to deal with practical problems effectively. The main contribution of the article was to reproduce and clarify the advantages of the methods discussed. Thus, the specific objectives were: (i) Identify the plant to control; (ii) discretize the plant; (iii) Build the control law; (iv) Implement the identification algorithm; and (v) Validate the results. From numerical simulations, the performance of each algorithm and its characteristics were analyzed. The RLSM has an excellent transient regime, but a high computational cost. The GM has the slower accommodation time when compared to the RLSM, however it has low computational demand. By taking into account the characteristics of each algorithm, having prior knowledge about the plant to be controlled helps in choosing the algorithm that best suits the needs, thus enhancing the performance of the control system.

KEYWORDS: Comparison of parametric methods. Model Reference Adaptive Control (MRAC). Gradient Method (GM). Recursive Least Squares Method (RLSM).

INTRODUÇÃO

O controle adaptativo surgiu na década de 50, na área de processos de automação e na aviação. Ao longo das últimas décadas, esse tipo de estratégia de controle tem ganhado espaço em aplicações de modelos variantes no tempo. O motivo para o avanço do controle adaptativo foi para desenvolver sistemas de controle que pudessem se adaptar às mudanças na dinâmica do processo (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Uma classe de controladores adaptativos faz uso de métodos de estimação paramétrica e em tempo real. Assim, a partir dos parâmetros estimados, esses são usados na lei de controle para ajustar os ganhos do controlador ou regulador, cuja finalidade é atender aos critérios de desempenho (LANDAU *et al.*, 2011).

Os esquemas de CAMR podem ser caracterizados como indiretos ou diretos e com leis adaptativas normalizadas ou não normalizadas. No CAMR indiretos os parâmetros da planta são estimados em tempo real e a partir dessa estimativa os ganhos do controlador são calculados. No CAMR direto, o qual é abordado neste trabalho, os ganhos do controlador são estimados sem que haja cálculo intermediários. As leis adaptativas utilizadas no presente trabalho foram o MG e o MMQR (IANNOU, 1996).

Aplicou-se a estratégia de CAMR com estrutura direta a uma planta de segunda ordem com grau relativo igual a um. Para o sistema de CAMR, torna-se necessário projetar um controlador, em que seus ganhos sejam atualizados a cada mudança da planta ou de modo periódico. A partir do sinal de saída gerado, comparam-se os respectivos sinais da planta real e do modelo de referência, isso produz um sinal de erro. Assim, os novos ganhos do controlador são calculados a partir desse erro. O objetivo do CAMR é fazer com que os parâmetros convirjam para valores que conduzam a resposta da planta a tornar-se igual a resposta do modelo de referência (JACOMÉ, 2013; PAULO, 2015).

O artigo se encontra organizado da seguinte maneira: Seção de Materiais e Métodos tratou de demonstrar o conceito do CAMR por meio de diagrama de blocos, descreveu-se sobre a lei de controle e apresentaram-se os métodos de estimação paramétrica; na Seção Resultados e Discussões, apresentaram-se as respostas gerada de cada algoritmo, bem como um comparativo entre os dois métodos de estimação; e a Seção Conclusão, relataram-se as características observadas no sistema de controle em malha fechada.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR) é uma das principais abordagens no campo do controle adaptativo. Na Figura 1, ilustrou-se o esquema de CAMR, onde o modelo de referência é escolhido para gerar uma trajetória, y_m , que a saída da planta y_p deve seguir, para um dado sinal de referência r , expressado por:

$$e_1 = y_p - y_m \quad (1)$$

O sinal de erro, e_1 , mostrado na Equação (1) representa o quanto a planta desviou da trajetória desejada.

Com base nesse erro, Equação (1), os ganhos do controlador são alterados com o auxílio de estimador de parâmetros. Assim, deseja-se que o erro seja nulo ou o mais próximo de zero possível (IANNOU,1996).

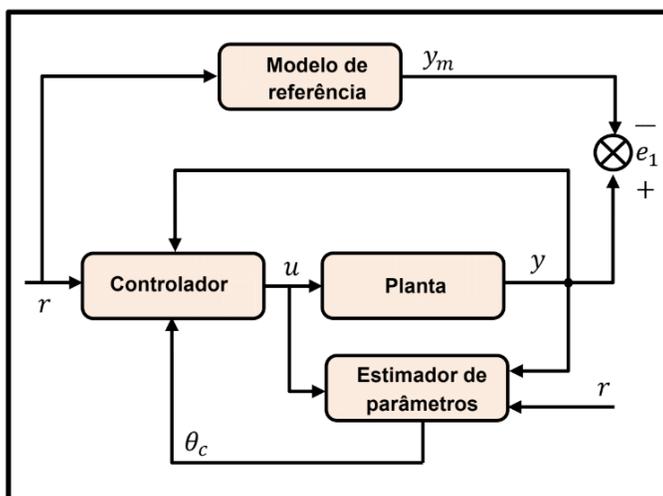


Figura 1 - Estrutura básica de um MRAC Direto

FONTE: Adaptado de Iannou (1996).

PLANTA DE ORDEM n COM GRAU RELATIVO $n^*=1$

Iannou (1996) descreveu uma planta SISO (do inglês, *Single Input Single Output* - SISO), linear invariante no tempo - LIT (do inglês, *Linear Time Invariant*), representada

pelas equações de estado e de saída, expressadas respectivamente como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u_p \\ y_p &= C_p^T x_p \end{aligned} \quad (2)$$

sendo x_p é o vetor de estados da planta, y_p o vetor de saída da planta e u_p o sinal de entrada da planta, e estes contêm n elementos para um sistema SISO de n -ésima ordem, além das matrizes A_p de transição de estados do sistema de tamanho $n \times n$, B_p matriz de entrada de tamanho $n \times 1$, C_p^T é a saída do sistema de tamanho $1 \times n$ (FRANKLIN, 2013).

Iannou (1996) mostrou que a função de transferência da planta é dada por:

$$y_p = G_p(s)u_p \quad (3)$$

sendo $G_p(s)$ a função de transferência, a qual pode ser expandida da forma:

$$G_p(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{D_p(s)} \quad (4)$$

sendo Z_p e D_p são polinômios mônicos da entrada e saída, respectivamente, e K_p é o ganho da função de transferência. A planta deve possuir grau relativo igual a um, $n^*=1$, expressado por $n^*=n_p - m_p$, sendo n_p ordem do denominador da planta e m_p ordem do numerador da planta.

Iannou (1996), mostrou que modelo de referência possui as mesmas características da planta e representado por equações de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= A_m x_m + B_m r \\ y_m &= C_m^T x_m \end{aligned} \quad (5)$$

sendo x_m é o vetor de estados do modelo, y_m o vetor de saída do modelo e r o sinal de referência da planta, e estes contêm n elementos para um sistema SISO de n -ésima ordem, além das matrizes: A_m a matriz de transição de estados do sistema de tamanho $n \times n$, B_m a matriz de entrada de tamanho $n \times 1$, C_m^T é a saída do sistema de tamanho $1 \times n$ (FRANKLIN, 2013).

De acordo com Iannou (1996) o modelo de referência também deve possuir grau relativo $n^*=1$. A função de transferência do modelo é dada por:

$$y_m = W_m(s)r \quad (6)$$

$W_m(s)$ é expresso na forma:

$$Q_m(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{D_m(s)} \quad (7)$$

DISCRETIZAÇÃO

As discretizações da planta e do modelo de referência foram feitas com o segurador de ordem zero (do inglês, *Zero Order Hold – ZOH*).

A conversão analógica-digital (A/D), é um processo de dois passos. Em um conversor A/D o sinal analógico é convertido em um sinal amostrado e, em seguida, convertido em uma sequência binária, o sinal digital. A taxa de amostragem deve ser ao menos o dobro da faixa de passagem do sinal. Essa frequência mínima de amostragem é denominada de *taxa de amostragem de Nyquist*. Para modelar sistemas digitais, deve-se obter uma representação matemática do processo do amostrador e segurador (NISE, 2013).

O modelo matemático para o amostrador é dado por:

$$f_{Tw}^*(t) = f(t)s(t)$$

$$f_{Tw}^*(t) = T_w \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(kT)\delta(t - kT) \quad (8)$$

A amostragem pode ser considerada o produto da forma de onda no domínio do tempo a ser amostrada, $f(t)$, com uma função de amostragem, $s(t)$. Se $s(t)$ é uma sequência de pulsos de largura T_w , amplitude constante e taxa uniforme, a saída amostrada, $f_{Tw}^*(t)$, consistirá de uma sequência de parte de $f(t)$ em intervalos regulares. Na Equação (8), o termo $\delta(t-kT)$ constitui em funções delta de Dirac. Com isso, o resultado da amostragem com pulsos retangulares pode ser considerado como uma série de funções delta em que suas áreas são o produto da largura do pulso retangular com a amplitude da forma de onda amostrada, ou $T_w f(kT)$ (NISE, 2013).

Para Nise (2013), o segurador de ordem zero produz uma aproximação em degraus para $f(t)$. Assim, a saída do segurador é uma sequência de funções degrau cuja amplitude é $f(t)$ no instante de amostragem, $f(kT)$. Como um único impulso a partir do amostrador produz um degrau durante o intervalo de amostragem, a transformada de Laplace deste degrau, $G_h(s)$, que é a resposta ao impulso do segurador de ordem zero, é a função de transferência do segurador de ordem zero. Ao utilizar um impulso no instante zero, a transformada do degrau resultante que começa em $t=0$ e termina em $t=T$, expressada por:

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (9)$$

Em um sistema físico, as amostras da forma de onda de entrada em função do tempo, $f(kT)$, são seguradas durante o intervalo de amostragem. Pode-se verificar a partir da Equação (9), que o circuito segurador integra a entrada e mantém seu valor durante todo o intervalo de amostragem. Como a área da função delta que vem do amostrador é $f(kT)$ ao integrar a forma de onda amostrada ideal e obter o mesmo resultado que para o sistema físico (NISE, 2013).

LEI DE CONTROLE

Silveira (2018) descreveu ao considerar que uma planta $G_p(s)$ de ordem n e grau relativo $n^*=1$, uma lei de controle descrita como:

$$u_p = \theta^T \varphi \quad (10)$$

sendo $\varphi=[\varphi_1^T, \varphi_2^T, y_p, r]^T$ e $\theta=[\theta_1^T, \theta_2^T, \theta_3, c_0]^T$, em que φ_1^T e φ_2^T vetores que compõem os filtros de reconstituição de estado, y_p o sinal de saída da planta e r o sinal de referência; $\theta_1^T, \theta_2^T, \theta_3, c_0$ vetores de ganho.

Os filtros de reconstituição de estado podem ser representados no domínio do tempo discreto como:

$$\varphi_1(k) = (I + \bar{F}T)\varphi_1(k-1) + gTu_p(k-1) \quad (11)$$

$$\varphi_2(k) = (I + \bar{F}T)\varphi_2(k-1) + gTu_p(k-1) \quad (12)$$

NORMALIZAÇÃO DE LEIS ADAPTATIVAS

De acordo com Silveira (2018) para resolver o problema da divergência das leis adaptativas quando o sinal de referência é excessivamente elevado, deve-se utilizar a técnica de normalização. A normalização divide a lei de adaptação por uma função quadrática m^2 . Este sinal m^2 age como um freio que evita a divergência dos parâmetros estimados. A solução frequentemente, dada por:

$$m^2 = 1 + \varphi^T \varphi \quad (13)$$

O uso de sinal de normalização, além de contribuir com a convergência da lei adaptativa, também melhora a robustez do controlador frente às incertezas da planta.

MÉTODO DO GRADIENTE – MG

Iannou (1996) descreveu um modelo paramétrico no tempo discreto:

$$z(k) = \theta^{*T} \psi(k) \quad (14)$$

sendo θ^* um vetor de parâmetros desconhecidos de ordem n e $z \in \mathbb{R}^n$ é conhecido para cada instantes de $k=1,2,3\dots$. A estimação do erro $e(k)$ é obtida por:

$$\hat{z} = \theta^T(k-1) \psi(k)$$

$$e(k) = \frac{z(k) - \hat{z}(k)}{m^2(k)} \quad (15)$$

a estimação do erro $e(k)$ no tempo k depende da estimativa anterior de θ^* , ou seja, no tempo $\theta(k-1)$, pois $\theta(k)$ é gerado em seguida a partir de $e(k)$.

A lei adaptativa é dada por:

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \Gamma \psi(k-1) e(k-1) \text{sgn}(p^*) \quad (16)$$

sendo Γ é um ganho fixo, ψ é um vetor regressor, $e(k)$ o erro entre a resposta estimada e a resposta real e o valor absoluto $\text{sgn}(p^*) = \text{sgn}(K_p/K_m)$.

MÉTODOS DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO – MMQR

De acordo com Åström (2008) neste método, os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático devem ser escolhidos de tal forma que a soma dos quadrados de suas diferenças, deve ser mínima. O algoritmo normalizado apresentado por Iannosun (1996) é formado por uma matriz de covariância, expressada por:

$$\dot{P} = \frac{-P\zeta\zeta^T P}{m^2} \quad (17)$$

A Equação (17) pode ser implementada na forma digital como:

$$P(k) = P(k-1) - T \frac{P(k-1)\zeta(k-1)\zeta(k-1)^T P(k-1)}{m^2(k-1)} \quad (18)$$

e a estimativa dos parâmetros:

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \frac{P(k-1)\text{sgn}(p^*)\zeta(k-1)e(k-1)}{m^2(k-1)} \quad (19)$$

sendo $\zeta(k)$ um vetor regressor e $e(k)$ é o erro entre a resposta estimada e a resposta real e o valor absoluto $\text{sgn}(p^*) = \text{sgn}(K_p/K_m)$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o presente trabalho, foi desenvolvido um algoritmo do MRAC direto, onde foi comparado o desempenho do MMQR e do MG na identificação de parâmetros.

A planta utilizada para análise foi apresentada por Correa e Gualhano (2019). A função de transferência para a planta é dada por:

$$G_p(s) = \frac{s+3}{s^2-2s+1} \quad (20)$$

A forma discretizada da função de transferência da planta é dada por:

$$G_p(z) = \frac{0.01005z - 0.009752}{z^2 - 1.98z + 0.9802} \quad (21)$$

A função de transferência para o modelo de referência é:

$$W_m(s) = \frac{2(s+2)}{s^2+6s+5} \quad (22)$$

A forma discretizada do modelo de referência é dada por:

$$W_m(z) = \frac{0.01961z - 0.01922}{z^2 - 1.941z + 0.9418} \quad (23)$$

Para o desenvolvimento do algoritmo do MMQR, utilizou-se uma onda quadrada como sinal de referência. A função de transferência para a planta e para o modelo de referência são mostradas nas Equações (20) e (22), respectivamente. Esse método possui um ótimo regime transitório, devido a sua matriz de covariância P ser atualizada a cada recursão. A matriz de covariância deve ser inicializada com valores elevados, pois quanto

mais alto o valor, mais rápido será a convergência, contudo valores extremamente elevados podem levar a divergência numérica. Esse método possui um custo computacional mais alto quando comparado ao MG, devido a atualização constante da matriz de covariância P . Na Figura 2, apresentou-se a saída da planta juntamente com o modelo de referência, onde pode-se notar a robustez desse método. Na Figura 3, ilustrou-se a atualização do erro. Na Figura 4, apresentou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), onde nota-se que o erro chega próximo de zero muito rápido, onde também pode ser notado a eficiência do algoritmo.

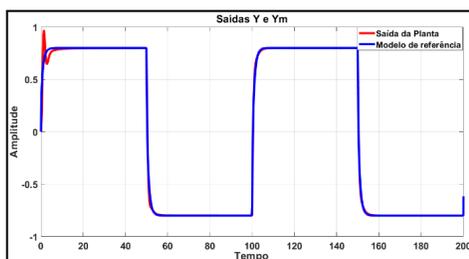


Figura 2 - Saídas Identificador MMQ.

Fonte: Autoria Própria

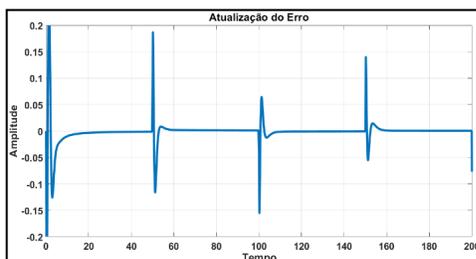


Figura 3 – Atualização do erro.

Fonte: Autoria Própria

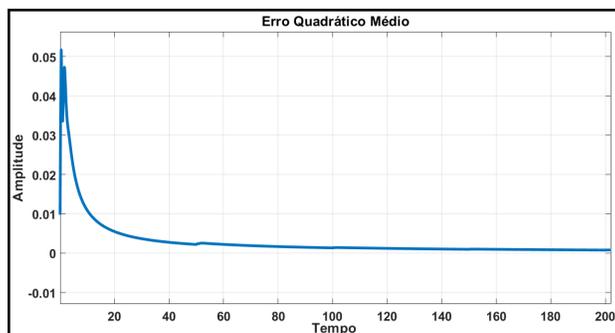


Figura 4 – Erro Quadrático Médio MMQ

Fonte: Autoria Própria

Para o desenvolvimento do algoritmo do MG, usou-se também uma onda quadrada como sinal de referência e a planta e modelo de referência apresentadas nas Equações (18) e (20), respectivamente. Esse método possui um regime transitório mais lento do que o MMQR, mas é eficiente quando os ganhos do controlador são próximos dos reais. O algoritmo diverge se possuir ganho muito elevado. Por possuir ganho fixo, e com isso, dispensa a atualização dessa constante, ele tem baixo custo computacional ao comparar com o MMQR. Na Figura 5, apresentou-se a saída da planta juntamente com o modelo de referência, assim nota-se um tempo maior para a acomodação do sinal. Na Figura 6, mostrou-se a atualização do erro. Na Figura 7, apresentou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), este que em comparação com o algoritmo MMQR, exige um tempo maior para que o erro fique próximo a zero.

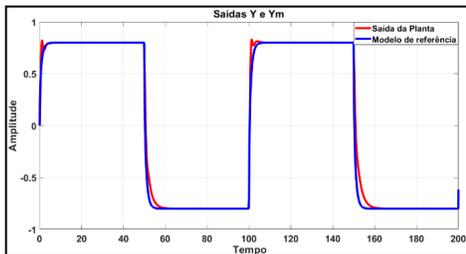


Figura 5 - Saídas Identificador Gradiente.

Fonte: Autoria Própria

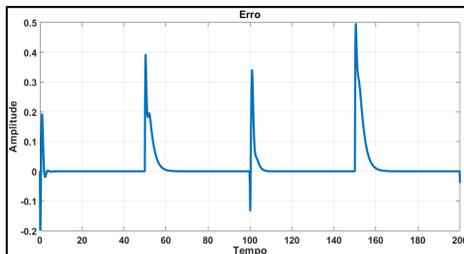


Figura 6 – Atualização do erro.

Fonte: Autoria Própria

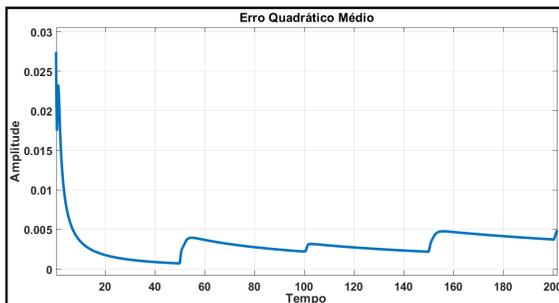


Figura 7 – Erro Quadrático Médio MG.

Fonte: Autoria Própria

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre dois métodos de estimação paramétrica aplicados ao CAMR direto, o MMQR e o MG, assim analisou-se o desempenho em malha fechada de cada algoritmo ao serem aplicados a uma mesma planta e modelo de referência.

Os resultados obtidos se mostram atrativos, visto que, cada método de estimação tem sua característica de desempenho particular. O MG possui seus ganhos próximos dos ganhos verdadeiros e baixa demanda de processamento. Já o MMQR possui maior estabilidade numérica, mas tem um custo computacional muito maior que o MG apresentado. Cabe ao projetista decidir qual a melhor opção a se usar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio e por toda a ajuda ao professor Dr. Leandro Castilho Brolin e em especial ao Dr. Flávio Luiz Rossini, pelo trabalho que tem realizado como orientador.

REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. **Adaptive control**. 2.ed. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2008.

CORRÊA, Yago P.; GUALHANO, Mariana A. Controle Adaptativo por Modelo de Referência Direto. **VI Congresso de ensino, pesquisa e extensão**. Instituto Federal Fluminense. 2019.

DONADOM, Lázaro V. **Estudo de métodos de estimação de parâmetros aplicados ao controle adaptativo auto-sintonizado**. 1998. 154 f. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1998.

FRANKLIN, Gene F. et al. **Sistemas de controle para engenharia**. 6.ed. tradução: Fernando de Oliveira Souza; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. Porto Alegre: Bookman, 2013.

IOANNOU, Petros A.; SUN, Jing. **Robust Adaptive Control**. Prentice Hall, Inc. 1996.

IOANNOU, Petros; BARIS, Fidanş. **Adaptive Control Tutorial**. Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia. 2006.

JÁCOME, Isael C. **Controle adaptativo por modelo de referência e estrutura variável discreto no tempo**. 2013. 71 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2013.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6.ed. Tradução e revisão técnica: Jackson Paul Matsuura. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PAULO, Thiago F. **Controle adaptativo com desacoplamento aplicado a um sistema de tanques acoplados MIMO**. 65 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

SILVEIRA, Wagner da S. **Aplicativo de projeto e análise de desempenho de controladores adaptativos por modelo de referência**. 2018. 104 f. Trabalho de Conclusão de curso.

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 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 