

Desenvolvimento de biblioteca para Arduino empregando o MRAC, aplicado no controle de velocidade de motor tacogerador

Juan V. B. dos Santos * José D. F. de O. Luna **
Kariston D. Alves ***

* Faculdade de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal, RO, (e-mail: juan.santos@estudante.ifro.edu.br)

** Faculdade de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal, RO, (e-mail: jose.luna@ifro.edu.br)

*** Faculdade de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal, RO, (e-mail: kariston.alves@ifro.edu.br)

Abstract: When it comes to learning, there is no doubt that practice is one of the better ways. With that in mind, this work aims to promote the advanced control practice for students and research, using the Arduino through a library for implementing adaptive control by reference model. This research will be based on the inductive method, where it will be research on adaptive control by reference model was carried out, Library Libraries for Arduino, its development on GitHub and how to auxiliary practice in teaching. Finally, to have as a product the library for Arduino capable of employing MRAC in a simple and didactic way, and as an example will be applied in a module with a tachogenerator motor. This project will have the ability to provide, under the ideals of open science, a tool for educators of any educational institution, to work, in a practical way, skill and competencies related to adaptive control, with emphasis on the MRAC.

Resumo: Quando o assunto é aprendizado, não há dúvidas de que a prática é um dos melhores caminhos. Pensando nisso, esse trabalho tem como objetivo promover a prática de controle avançado para estudantes e pesquisadores, utilizando-se do Arduino através de uma biblioteca para implementação do controle adaptativo por modelo de referência. Essa pesquisa irá se basear no método indutivo, onde será realizada a pesquisa sobre controle adaptativo por modelo de referência, desenvolvimento de bibliotecas para Arduino, sua publicação no GitHub e como a prática auxilia no ensino. Para ao final, possuir como produto a biblioteca para Arduino capaz de empregar o MRAC de forma simples e didática, e como exemplo será aplicado em um módulo com motor tacogerador. Esse projeto terá a capacidade de fornecer, sob os ideais de ciência aberta, uma ferramenta para educadores de qualquer instituição de ensino, para trabalhar, de forma prática, habilidades e competências relacionadas ao controle adaptativo, com destaque para o MRAC.

Keywords: MRAC; Arduino; open science; GitHub; nonlinear systems.

Palavras-chaves: MRAC; Arduino; ciência aberta; GitHub; sistemas não-lineares.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

Durante o desenvolvimento de projetos de controle é comum se deparar com problemas não-lineares, ou seja, determinado componente (motor, válvula, entre outros) não possui a mesma resposta ao mesmo comando em diferentes pontos de operação.

Em situações deste tipo costuma haver dois caminhos: Controle regulatório ou Controle servo. No controle regulatório, mantém-se o SP (*SetPoint*, palavra inglesa para Ponto Objetivo ou Meta) e o objetivo principal, em regime permanente, é rejeitar perturbações. Já no Controle servo o SP é variável, sendo necessário que a variável controlada

tanto acompanhe cada novo SP, quanto rejeite perturbações, ou seja, um controle adaptativo.

Entretanto, em sistemas lineares não importa se o controle é regulatório ou servo, pois em ambos os casos os parâmetros de dinâmica do sistema não se alteram. Porém em sistemas não lineares há uma maior dificuldade em se realizar o controle servo em relação ao regulatório.

Para esta segunda dinâmica há a necessidade aplicação de técnicas de controle avançado, dentre elas o controle adaptativo. O funcionamento do controle adaptativo se baseia na adaptação do sistema de controle se baseando na variação da dinâmica do sistema controlado.

Porém a implementação do controle adaptativo em sistemas não-lineares requer conhecimentos mais avançados, o que desmotiva inúmeros educadores devido a falta de

tempo ou a dificuldade que há em passar esse conhecimento, e dessa forma que resolvem utilizar técnicas de controle mais simples.

1.2 Justificativa

Levando em conta as dificuldades destes pesquisadores e estudantes, como é possível diminuir a dificuldade e tempo de implantação do controle adaptativo? Uma alternativa para responder a essa pergunta é desenvolver um facilitador que possa ser utilizado no ensino do controle adaptativo, como por exemplo uma biblioteca, em que o usuário precisa apenas informar dados básicos do sistema a ser controlado.

Além disso, por se tratar de pequenos projetos, uma boa alternativa é criar esta biblioteca no ambiente do Arduino, um microcontrolador largamente utilizado em pequenos projetos das áreas de robótica e eletrônica. E para tornar acessível essa facilidade a um maior número de pessoas, um bom caminho seria disponibilizar essa biblioteca em um site muito utilizado por pesquisadores da área, como o GitHub, tanto na língua portuguesa como inglesa.

1.3 Objetivo geral

Tendo isso em vista, esse artigo visa desenvolver uma biblioteca para uso em dispositivos Arduino, que seguindo o ideal de ciência aberta, será disponibilizada em língua portuguesa e inglesa gratuitamente no GitHub. Essa biblioteca será capaz de implementar o MRAC (*Model Reference Adaptive Control*, Controle Adaptativo por Modelo de Referência). E como forma de demonstração, será também apresentado o seu uso prático em um módulo eletrônico de controle de velocidade de rotação de motor DC (*direct current*, corrente contínua) por um motor tacogenerador.

1.4 Objetivos específicos

De maneira a alcançar o desejado objetivo deste trabalho, é necessário que alguns passos sejam realizados. Dentre eles tem-se a necessidade do entendimento base do método MRAC, para assim ser capaz de entender como outros autores na área utilizaram este método em suas pesquisas e projetos. Com base nisso, adentrar no estudo sobre desenvolvimento de bibliotecas de Arduino e de como cálculos matemáticos mais complexos podem ser traduzidos em código. E finalizando essa parte de estudo base, será realizada uma revisão do circuito eletrônico do módulo eletrônico utilizado de exemplo. Tudo isso servirá de base para o desenvolvimento adequado deste projeto, que espera também disponibilizar o produto no *site* GitHub, em português brasileiro e inglês americano de forma a beneficiar um maior número de pessoas envolvidas em projetos com controle adaptativo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Dentro do controle adaptativo há ainda outros métodos, como o escalonamento de ganhos, Lógica Fuzzy (falar de outros controles adaptativos) nesta pesquisa utiliza-se o controle direto do MRAC pela regra do MIT. Apesar de demonstrado não possuir a melhor performance quando

comparado com o MRAC pelo método de Lyapunov, como apresentando em (mencionar um autor que tenha feito a comparação), esse trabalho tem como propósito ser uma pesquisa de entrada na área de bibliotecas de controle adaptativo para microcontroladores. Visto que há pouca utilização exclusiva no Arduino no controle adaptativo, com destaque nas pesquisas brasileiras.

IMAGEM E TEXTO SOBRE MRAC E FORMULAS

2.1 MRAC em outras áreas

De maneira geral, diversos autores da atualidade utilizam-se do método adaptativo MRAC para o desenvolvimento de seus projetos. Podemos citar o trabalho de Parvat e Pawar (2015) ao projetar um pêndulo invertido com controle adaptativo afim de servir como base de pesquisa para controle de braços robóticos, sistema de lançamento de satélites, entre outros.

Além desse é observado também sua aplicação em sistemas pneumáticos de para lavagem de garrafas (Mushiri et al, 2017) afim de evitar desperdícios, por se tratar de uma operação com variação nos parâmetros de temperatura e pressão. Observa-se também a aplicação do MRAC em manufatura aditiva, conhecida popularmente como impressão 3D, como é apresentado por Candy (2021).

Um exemplo cada dia mais presente são os carros autônomos, parte dessa tecnologia utiliza um sistema de controle de distância entre veículos, que necessita funcionar bem em situações diversas como inclinação da rua, pista molhada, velocidade da via, peso do carro, entre outros. Para isso também é utilizado o MRAC, como é apresentado por Sapiee e Sudin (ANO).

Na literatura também é observado a relevância que o MRAC tem nos dias atuais, como exemplo o livro Controle Adaptativo Teoria e Aplicação por Rodrigo Tambara e o livro *Adaptive Control* por Karl Åström e Björn Wittenmark, apresentam o controle adaptativo de forma clara e descritiva. Também vale destacar o artigo *Robust Model Reference Adaptive Control* (Kreisselmeier e Anderson, 1986) que é citado por centenas de outros trabalhos.

2.2 MRAC em motores DC

Porém, voltando-se ao tema principal desta pesquisa, tem-se como destaque autores que utilizaram o MRAC no controle de velocidade de motores DC. Para este projeto tomou-se como referência de metodologia de pesquisa artigos de comparação de performance do MRAC em sistemas de controle de velocidade de motores DC.

Nesta pesquisa foi selecionado os trabalhos de Mallick e Mondal (2019), ... com destaque para o artigo de Souza et al. (ANO) do qual foi utilizado o módulo didático produzido, afim de servir como exemplo de funcionamento da biblioteca desenvolvida.

Na pesquisa de Mallick e Mondal (2019) ... FALAR DA PESQUISA DE FORMA RESUMIDA E DO SISTEMA DE ANÁLISE DE PERFORMANCE.

PARÁGRAFO DO ARTIGO "DESIGN OF MRAC AND MODIFIED MRAC FOR DC MOTOR SPEED CONTROL" DE MANIMOZHI E RAJATHI 2021

PARAGRAFO DO ARTIGO "APPLICATION OF A PID CONTROLLER USING MRAC TECHNIQUES FOR CONTROL OF THE DC ELECTROMOTOR DRIVE"DE XIONG E FAN 2007

PARAGRAFO DO ARTIGO "THE MRAC BASED - ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR CONTROLLING THE SPEED FO DIRECT CURRENT MOTOR"DE NGUYEN ET AL. 2020

Já na pesquisa de Souza et al. (ANO) ... FALAR DA PESQUISA DE FORMA RESUMIDA E QUE É O MODULO UTILIZADO COMO BASE PARA A BIBLIOTECA, MOSTRANDO A IMAGEM DO MODULO PRONTO E O DIAGRAMA ELETRICO.

FALAR Q TODAS AS REFERENCIAS FORAM COM MODELAGEM, ENQUANTO EU VOU FAZER COM EXEMPLO FISICO

2.3 Biblioteca de MRAC para Arduino

FALAR QUE APESAR DE PESQUISADO, NAO FOI ENCONTRADO JA EXISTENTE BIBLIOTECA DE ARDUINO PARA APLICAÇÃO DO MRAC

3. DESENVOLVIMENTO

PARAGRAFO PARA Dar uma introdução na parte sobre o desenvolvimento, antes de falar do desenvolvimento especifico de cada parte.

3.1 MRAC para MATLAB

PARAGRAFO PARA FALAR DO ESTUDO SOBRE MRAC E SEU USO NO MATLAB

3.2 MATLAB para Arduino

PARAGRAFO PARA EXPLICAR A CONVERSAO E ADAPTAÇÃO DO CODIGO AO PASSAR DO MATLAB PARA O ARDUINO

PARAGRAFO EXPLICANDO A DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA (METODO DE EULER)

3.3 Arduino e módulo tacogerador

PARAGRAFO EXPLICANDO QUE MANTEVE-SE A LIGAÇÃO ELETRONICA UTILIZADA NO ARTIGO DO MODULO TACOGERADOR E SUA LIGAÇÃO COM O ARDUINO

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

PARAGRAFO SOBRE A FORMA DE MEDIR A PERFORMANCE (USAR O MESMO DE UM ARTIGO Mallick e Mondal 2019) (TEMPO DE ACOMODAÇÃO, OVERSHOOT ...) E COMO FOI REALIZADA AS MEDIÇÕES (VARIÁVEIS UTILIZADAS, SP E PERÍODO...)

4.1 Controle adaptativo

APRESENTAR A PERFORMANCE DO CONTROLE ADAPTATIVO EM VARIOS PONTOS DE OPERAÇÃO (UMA UNICA IMAGEM MOSTRANDO O SP EM DEGRAIS INDO DE 0 A 100 E A SAIDA REAL, UMA IMAGEM PARA CADA VALOR DA TAXA DE ADAPTAÇÃO

PARAGRAFO SOBRE A DECISAO DE ESCOLHA DO VALOR DA TAXA DE ADAPTAÇÃO, COMO AFETA O SISTEMA E QUE CHUTE REALIZAR

TABELA DE PERFORMANCE DO MRAC

4.2 Controle PI

APRESENTAR A PERFORMANCE DO CONTROLE PI DO ARTIGO DO MODULO UTILIZADO EM VARIOS PONTOS DE OPERAÇÃO (UMA UNICA IMAGEM MOSTRANDO O SP EM DEGRAIS INDO DE 0 A 100 E A SAIDA REAL

TABELA DE PERFORMANCE DO PI

4.3 Comparação

PARAGRAFO COMENTANDO AS PERFORMANCES E O RESULTADO ENCONTRADO

TABELA CONJUNTA DE PERFORMANCES MRAC E PI

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

PARAGRAFO RETOMANDO O RESUMO (IDEIA DA PESQUISA, OQ FOI REALIZADO NA PESQUISA, RESULTADO DA PESQUISA)

Apesar desta pesquisa ter como objetivo o viés educativo como uma biblioteca de Arduino, este mesmo trabalho pode ser utilizado em projetos independentes (popularmente conhecidos como DIY - Do It Yourself, Faça você mesmo), MVPs (Minimal Product Viable, Mínimo Produto Viável) e projetos de teste em empresas de pequeno porte.

PARAGRAFO COMENTANDO DE PONTOS FALTANTES NA PESQUISA QUE PODEM SER COMPLETADOS E AVANÇADOS EM PESQUISAS FUTURAS, COMO CRESCIMENTO DA BIBLIOTECA PARA OUTRAS VARIAÇÕES DO MRAC, PARA OUTROS CONTROLES ADAPTATIVOS, ALEM DA ESPECILIZAÇÃO DO CODIGO PARA APLICAÇÕES DIFERENTES QUE UTILIZE O CONTROLE ADAPATIVO (ESTUDO AVANÇADO DO VALOR DA TAXA DE ADAPTAÇÃO PARA CADA TIPO DE USO)

Após apresentar uma equação, por exemplo,

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{D\partial^2 F}{\partial x^2}, \quad (1)$$

algumas palavras podem ser necessárias para descrever a equação (1), se houver tempo e espaço suficientes.

Veja Able (1956), Able et al. (1954), Keohane (1958) e Powers (1985).

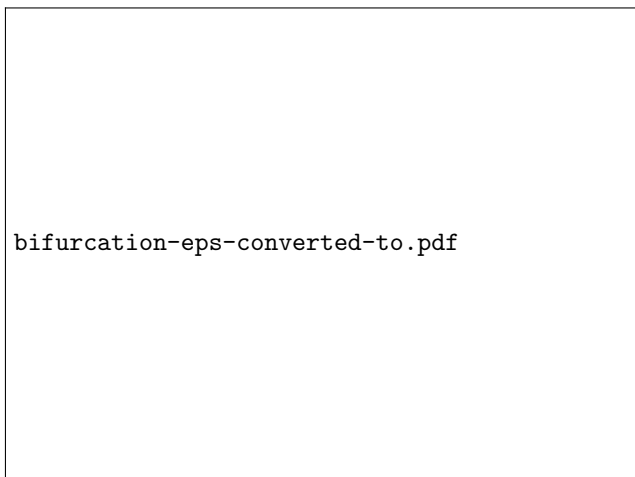


Figura 1. Bifurcação: Máximos locais de x com o amortecimento a decrescendo.

Exemplo. Esta equação vai muito além do celebrado teorema do grande Pitágoras.

Alguns ambientes como teorema, lema, corolário e prova estão definidos no preâmbulo do arquivo `sbaconf.tex`. Por exemplo, para inserir um lema, utilize

```
\begin{lema}
O quadrado da hipotenusa é igual à soma dos
quadrados dos catetos em um triângulo retângulo.
\end{lema}
```

resultando em

Lema 1. O quadrado da hipotenusa é igual à soma dos quadrados dos catetos em um triângulo retângulo.

Para inserir uma prova, utilize

```
\begin{prova}
Em um triângulo retângulo, a soma do quadrado
dos catetos (lados menores) é igual ao quadrado
da hipotenusa (lado maior).
\end{prova}
```

resultando em

Prova. Em um triângulo retângulo, a soma do quadrado dos catetos (lados menores) é igual ao quadrado da hipotenusa (lado maior).

Caso queira criar um novo ambiente, por exemplo, definição, siga o modelo dos ambientes criados previamente.

É claro, todos os recursos do \LaTeX para o tratamento de equações podem ser utilizados para melhorar a apresentação.

5.1 Figuras

Para inserir figuras, use o pacote `graphicx`. Outros pacotes podem também ser usados, porém `graphicx` é um dos mais simples. Veja a Figura 1 como exemplo.

Figuras devem ser centralizadas, e ter uma legenda abaixo.

5.2 Tabelas

Tabelas devem ser centralizadas, ter uma legenda acima e ser numeradas em arábicos. Veja a Tabela 1 para um exemplo.

Tabela 1. Margens.

Página	Topo	Baixo	Esquerda/Direita
Primeira	3,5	2,5	1,5
Demais	2,5	2,5	1,5

5.3 Estágio Final

Espera-se que os autores respeitem as margens diligentemente. Os artigos precisam receber o logo com a data do evento e numeração para posterior inclusão nos Anais. Se o seu manuscrito viola as margens, você será chamado a preparar uma nova versão (podendo atrasar a preparação dos Anais), ou poderá mesmo ser excluído dos Anais.

Margens nas páginas. Veja a Tabela 1 para as especificações de margem. Todas as dimensões são em *centímetros*.

5.4 Criação do PDF

Todas as fontes devem estar incluídas no arquivo PDF. Use uma das seguintes ferramentas para produzir um PDF de boa qualidade:

PDFLaTeX é uma versão especial do \LaTeX , de Han The Thanh, que produz o PDF diretamente do arquivo `tex` usando fontes do Tipo-1, sem passar pelo arquivo `dvi` padrão. Aceita figuras nos formatos JPEG, PNG e PDF, mas não PostScript. Figuras produzidas em PostScript encapsulado (EPS) podem ser convertidas em PDF, por exemplo, com a ferramenta `epstopdf` ou com o Adobe Acrobat Distiller.

Gerar o PDF a partir do PostScript é a maneira clássica de produzir arquivos PDF do \LaTeX . Os passos são:

- (1) Produza um arquivo `dvi` rodando `latex` duas vezes.
- (2) Produza um arquivo PostScript (`ps`) com `dvips`.
- (3) Produza um arquivo PDF com `ps2pdf` ou Adobe Acrobat Distiller.

5.5 Copyright

A SBA ou os organizadores do congresso devem requerer, no momento devido, um formulário de transferência de *Copyright*. Mais informações serão dadas no *site* do congresso.

6. UNIDADES

Use preferencialmente unidades do Sistema Internacional (SI). Outras unidades podem ser utilizadas como unidades secundárias (entre parênteses). Isto se aplica em armazenamento de dados. Escreva, por exemplo, “15 Gb/cm² (100 Gb/in²)”. Uma exceção é quando unidades inglesas são usadas na identificação de algum item comercial, como “disco de 3.5 polegadas”. Evite misturar unidades SI com outras, como por exemplo corrente elétrica em amperes e

campo magnético em oersteds. Isso frequentemente causa confusão, pois as equações não batem dimensionalmente. Se você realmente precisar usar unidades mistas, deixe claro as unidades para cada termo em uma equação. A unidade SI para força do campo magnético \mathbf{H} é A/m. No entanto, se você quiser utilizar unidades de T, refira-se à densidade de fluxo magnético \mathbf{B} ou força do campo magnético simbolizada por $\mu_0 \mathbf{H}$. Use um ponto centralizado para separar unidades compostas, p. ex., “A · m²”.

7. DICAS ÚTEIS

7.1 Figuras e Tabelas

Legendas dos eixos das figuras são frequentemente uma fonte de confusões. Use palavras ao invés de símbolos. Por exemplo, escreva a quantidade “Magnetização”, ou “Magnetização M”, não apenas “M”. Coloque unidades entre parênteses. Não marque os eixos apenas com unidades ou quantidades. Por exemplo, escreva “Temperatura (K)”, não “Temperature/K”.

Multiplicandos podem ser especialmente confusos. Escreva “Magnetização (kA/m)” ou “Magnetização (10³A/m)”. Não escreva “Magnetização (A/m) × 1000” pois o leitor não saberá se a legenda do eixo significa 16000 A/m ou 0.016 A/m.

7.2 Referências

Use referências no estilo Harvard (veja no final deste documento). Com L^AT_EX, você pode processar uma base externa de dados bibliográficos usando `bibtex`,¹ ou então inserir as referências diretamente na seção correspondente. Evite as notas de rodapé. Por favor, note que o estilo preferido de referências é o que se encontra no final deste documento. Artigos que não foram publicados devem ser citados como “unpublished”. Use maiúscula apenas na primeira palavra do título do artigo, exceto para nomes próprios, acrônimos e símbolos. Todos os autores devem ser explicitados nos artigos. Note que você pode citar com `\cite{label}` quando a citação fizer parte do texto ou com `\citep{label}`.

7.3 Abreviações e Acrônimos

Defina as abreviações e os acrônimos na primeira ocorrência do texto do artigo, mesmo se foram definidos no abstract. Abreviações conhecidas, como SI ou SBA, não precisam ser definidas. Abreviações que incorporam pontos não devem conter espaços (escreva “C.N.R.S.”, não “C. N. R. S.”). Não use abreviações no título, exceto se forem inevitáveis.

7.4 Equações

Numere as equações de forma consecutiva, com números entre parênteses encostados no lado direito da margem, como em (1). Para tornar suas equações mais compactas, você pode usar /, a função exp, ou expoentes apropriados. Use parênteses para evitar ambiguidades. Pontue as equações quando estas forem parte do texto, como em

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \times \int_0^\infty \exp(-\lambda|z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r_i) d\lambda \quad (2)$$

Certifique-se que os símbolos em sua equação tenham sido previamente definidos (ou defina-se imediatamente depois). Símbolos devem aparecer em itálico (*T* pode se referir à temperatura, mas *T* é a unidade tesla). Refira-se a “(1)”, não “Eq. (1)” ou “equação (1)”, exceto no começo de uma frase: “Equação (1) é ...”.

7.5 Outras Recomendações

Deixe um espaço após pontos e vírgulas. Uma afirmação entre parênteses no final de uma sentença é pontuada exteriormente (assim). (Uma frase entre parênteses é pontuada internamente.) Evite contrações (por exemplo, “prá” chegar ao resultado — use “para”).

8. CONCLUSÃO

Uma seção com a conclusão não é obrigatória. Apesar de uma conclusão poder ser usada para rever os principais pontos do artigo, não deve simplesmente replicar o resumo na conclusão. Uma conclusão pode ser utilizada para frisar a importância do artigo ou delinear extensões e aplicações.

AGRADECIMENTOS

Coloque aqui seus agradecimentos.

REFERÊNCIAS

- Able, B. (1956). Nucleic acid content of microscope. *Nature*, 135, 7–9.
- Able, B., Tagg, R., and Rush, M. (1954). Enzyme-catalyzed cellular transaminations. In A. Round (ed.), *Advances in Enzymology*, volume 2, 125–247. Academic Press, New York, 3rd edition.
- Keohane, R. (1958). *Power and Interdependence: World Politics in Transitions*. Little, Brown & Co., Boston.
- Powers, T. (1985). Is there a way out? *Harpers*, 35–47.

Apêndice A. SUMÁRIO DA GRAMÁTICA SÂNSCRITA

Apêndice B. ALGUM VOCABULÁRIO MAIA

¹ Nesse caso, você também vai precisar do arquivo `ifacconf.bst`, que é parte do pacote `ifacconf_latex.zip`