

# Desenvolvimento de biblioteca para Arduino empregando o MRAC para fins didáticos, demonstrado 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](mailto:juan.santos@estudante.ifro.edu.br))

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

\*\*\* Faculdade de Engenharia de Controle e Automação, Instituto  
Federal, RO, (e-mail: [kariston.alves@ifro.edu.br](mailto: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:** No ambiente de aprendizagem, observa-se o grande benefício da realização de atividades praticas. 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 MRAC (controle adaptativo por modelo de referência). [FRASE SOBRE O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA]. Que ao final, possui como produto a biblioteca para Arduino, disponibilizada no GitHub para acesso público, capaz de empregar o MRAC de forma simples com propósito de ser uma porta de entrada mais simples ao conteúdo de controle adaptativo em sistemas não-lineares, e como exemplo de uso será aplicado no controle de velocidade de um motor tacogerador. Esse projeto tem 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

Durante o desenvolvimento de projetos de controle é comum se deparar com dois principais objetivos de controle: Controle regulatório e controle servo.

No Controle Regulatório, mantém-se o SP (*SetPoint*, palavra inglesa para Ponto Objetivo ou Meta) e tem como objetivo rejeitar perturbações. [CITAÇÃO EXPLICANDO O QUE É CONTROLE REGULATORIO].

Já no Controle Servo o SP é variável ao longo do tempo, sendo necessário que a variável controlada tanto acompanhe cada novo SP, quanto rejeite perturbações. [CITAÇÃO EXPLICANDO O QUE É CONTROLE SERVO].

E a partir dessa condição, são definidos diferentes objetivos dependendo da aplicação desejada. Sendo uma das principais decisões, o tempo de acomodação, tornando o sistema mais robusto ou agressivo. Em outras palavras, [CITAÇÃO FALANDO SOBRE CONTROLE ROBUSTO OU ... O CONTRARIO DISSO].

Porém, além dessas considerações, é necessário observar a linearidade ou não-linearidade da planta para realizar o controle. Ou seja, [CITAÇÃO EXPLICANDO OQ SAOS SISTEMAS LINEARES E NAO LINEARES].

Apesar da diferença nos objetivos de controle, em sistemas lineares uma mesma técnica de controle funciona tanto para o controle servo como para o regulatório, visto que nesses sistemas a dinâmica da planta é constante para todo

SP, como confirmou [CITAÇÃO CONFIRMANDO A EXPLICAÇÃO EM CIMA SOBRE QUE SÃO SISTEMAS LINEARES].

Entretanto, em sistemas não-lineares o controle servo não pode ser realizado da mesma forma que o regulatório, pois nesses sistemas a dinâmica da planta é diferente para cada SP, como atestou [CITAÇÃO CONFIRMANDO A EXPLICAÇÃO EM CIMA SOBRE QUE SÃO SISTEMAS não-LINEARES].

### 1.1 Problemática

Para esta segunda dinâmica há a possibilidade da aplicação de técnicas de controle adaptativo. O funcionamento do controle adaptativo se baseia na adaptação do sistema de controle se amparando na variação da dinâmica do sistema controlado, ou seja, [CITAÇÃO EXPLICANDO O QUE É CONTROLE ADAPTATIVO].

Porém o controle adaptativo possui uma íngreme curva de aprendizado, que a depender da situação pode ser um motivo a mais para desistência daqueles que buscam aprender ou ensinar. Por exemplo, professores universitários podem evitar entrar nesse tópico durante aulas de controle avançado, pois seriam necessárias muitas aulas para que os alunos compreendessem e fossem capazes de projetar utilizando essa técnica.

### 1.2 Justificativa

Levando em conta essa dificuldade, como é possível facilitar a entrada no aprendizado do controle adaptativo? Uma alternativa para responder a essa pergunta é desenvolver um facilitador que possa ser utilizado no ensino introdutório do controle adaptativo, como por exemplo uma biblioteca, em que o usuário precise apenas informar dados básicos do sistema a ser controlado.

Além disso, por se tratar de uma ferramenta apenas introdutória, uma boa alternativa é criar esta biblioteca no ambiente do Arduino, um microcontrolador largamente utilizado em pequenos projetos das áreas de robótica e eletrônica [CITAÇÃO FALANDO DA IMPORTANCIA DO ARDUINO].

Há também opções de controladores como o ESP8266 e o Raspberry. O ESP pode ser programado pela mesma IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, em inglês) do Arduino, portanto a biblioteca seria funcional em ambos. E o Raspberry possui um preço elevado quando comparado com os demais microcontroladores.

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 de programação, como o GitHub, tanto na língua portuguesa como inglesa, para alcançar pessoas do mundo todo e ser facilmente compreendida por falantes do português brasileiro.

### 1.3 Objetivo geral

Tendo isso em vista, esse artigo visa desenvolver uma biblioteca para uso em dispositivos Arduino, que será

capaz de implementar o MRAC (*Model Reference Adaptive Control*, Controle Adaptativo por Modelo de Referência) em sistemas de primeira ordem. E seguindo o ideal de ciência aberta, será disponibilizada em língua portuguesa e inglesa gratuitamente no GitHub. Como forma de demonstração, será 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 tacogerador.

### 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 [CITAÇÃO FALANDO DE ALGUNS DOS CONTROLES ADAPTATIVOS EXISTENTES].

Dentre eles há o método por modelo de referência, o MRAC. Neste método o controlador se modifica a fim de fazer com que a saída real da planta seja igual a saída de um modelo de referência. [CITAÇÃO EXPLICANDO O QUE É O MRAC].

[IMAGEM DO MRAC]

Que pode ser distinguido em 2 formas: Controle direto ou indireto. No controle indireto os parâmetros da planta são estimados, e a partir disso o controlador é ajustado, como disse BRUCE (2021). Já no controle direto, não há identificação da planta, mas o controlador continua a se modificar a fim de zerar o erro entre a saída da planta e saída do modelo, como também disse BRUCE (2021). [CITAÇÃO FALANDO DO CONTROLE DIRETO E INDIRETO DO MRAC].

[IMAGEM DO CONTROLE INDIRETO DO MRAC]

[IMAGEM DO CONTROLE DIRETO DO MRAC]

Ainda dentro do MRAC, é possível projetar seu controle utilizando-se a regra do MIT ou pelo método de Lyapunov. Pela regra do MIT, os parâmetros desconhecidos são substituídos pelas suas estimativas em cada instante de tempo, como disse SILVA (2017). Já o método de Lyapunov é utilizada para garantir a convergência e estabilidade de sistemas com controle adaptativo, como disse SOUZA (2016). [CITAÇÃO EXPLICANDO A REGRA DO MIT E O MÉTODO DE LYAPUNOV].

[FORMULA DA REGRA DO MIT]

[FORMULA DO METODO DE LYAPUNOV]

Nesta pesquisa utilizou-se o controle direto do MRAC pela regra do MIT. Pois, como o objetivo deste trabalho é tornar a curva de entrada no controle adaptativo menos íngreme, optou-se pelas formas simples e compreensíveis do MRAC.

Além disso, segundo melhor conhecimento dos autores, a maioria das aplicações do MRAC foi realizada apenas em simulação em *softwares* com o MATLAB, uma menor quantidade chega a utilizar microcontroladores como o Arduino no projeto físico, porém nenhuma pesquisa foi encontrada desenvolvendo uma biblioteca.

### 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 se um operação com variação nos parâmetros de temperatura e pressão. Observa-se tbm 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 dos 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 destaque 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

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

PARÁGRAFO DO ARTIGO "THE MRAC BASED - ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR CONTROLLING THE SPEED OF 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 MÓDULO UTILIZADO COMO BASE PARA A BIBLIOTECA, MOSTRANDO A IMAGEM DO MÓDULO PRONTO E O DIAGRAMA ELÉTRICO.

FALAR Q TODAS AS REFERÊNCIAS FORAM COM MODELAGEM, ENQUANTO EU VOU FAZER COM EXEMPLO FÍSICO

### 2.3 Biblioteca de MRAC para Arduino

FALAR QUE APESAR DE PESQUISADO, NÃO FOI ENCONTRADO JÁ EXISTENTE BIBLIOTECA DE ARDUINO PARA APLICAÇÃO DO MRAC

## 3. DESENVOLVIMENTO

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

### 3.1 MRAC para MATLAB

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

### 3.2 MATLAB para Arduino

PARÁGRAFO PARA EXPLICAR A CONVERSÃO E ADAPTAÇÃO DO CÓDIGO AO PASSAR DO MATLAB PARA O ARDUINO

PARÁGRAFO EXPLICANDO A DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA (MÉTODO DE EULER) USAR REFERÊNCIA

PARÁGRAFO EXPLICANDO O FUNCIONAMENTO DA BIBLIOTECA DE FORMA GÊNICA (FLUXOGRAMA)

### 3.3 Arduino e módulo tacômetro

PARÁGRAFO EXPLICANDO QUE MANTEVE-SE A LIGAÇÃO ELÉTRICA UTILIZADA NO ARTIGO DO MÓDULO TACÔMETRO 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 VÁRIOS PONTOS DE OPERAÇÃO (UMA ÚNICA IMAGEM MOSTRANDO O SP EM DEGRAIS INDO DE 0 A 100 E A SAÍDA REAL, UMA IMAGEM PARA CADA VALOR DA TAXA DE ADAPTAÇÃO

PARAGRAFO SOBRE A DECISÃO 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 MÓDULO UTILIZADO EM VÁRIOS PONTOS DE OPERAÇÃO (UMA ÚNICA IMAGEM MOSTRANDO O SP EM DEGRAIS INDO DE 0 A 100 E A SAÍDA 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, ALÉM DA ESPECIALIZAÇÃO DO CÓDIGO PARA APLICAÇÕES DIFERENTES QUE UTILIZE O CONTROLE ADAPTATIVO (ESTUDO AVANÇADO DO VALOR DA TAXA DE ADAPTAÇÃO PARA CADA TIPO DE USO)

## REFERÊNCIAS