



**INSTITUTO  
FEDERAL**

Rondônia

*Campus*  
Porto Velho Calama

# Desenvolvimento de biblioteca para Arduino empregando o MRAC para fins didáticos, demonstrado no controle de velocidade de motor tacogerador

Graduando:  
Juan Victor Basitt  
dos Santos

Orientadores:  
José Luna  
Kariston Alves



# Biblioteca de MRAC

A ideia é que essa biblioteca seja como as rodinhas de bicicleta para quem está aprendendo sobre MRAC (Controle Adaptativo por Modelo de Referência).



# ÍNDICE

01

## INTRODUÇÃO

Abordagem geral do problema  
e solução proposta

03

## DESENVOLVIMENTO

Etapas do desenvolvimento da  
pesquisa

02

## REFERENCIAL TEÓRICO

Base teórica e prática para o  
projeto

04

## RESULTADOS E CONCLUSÕES

Uso da biblioteca na análise do  
controle por MRAC no tacogerador



01

# INTRODUÇÃO

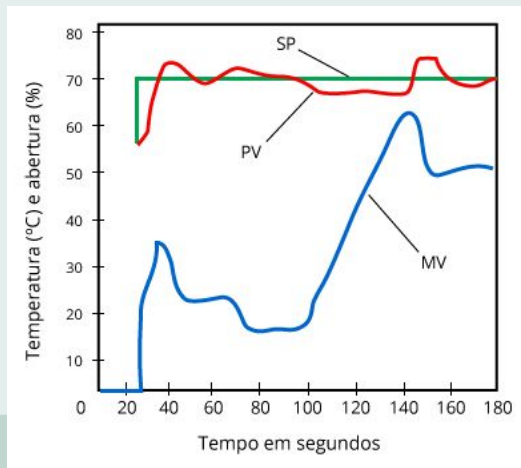
Abordagem geral do  
problema e solução  
proposta



# OBJETIVOS DE CONTROLE

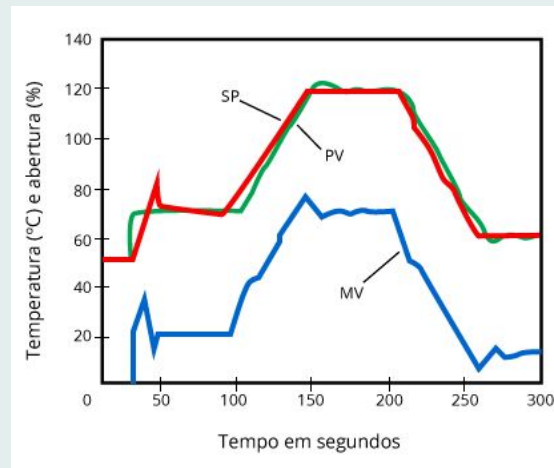
## 01

### REGULATÓRIO



## 02

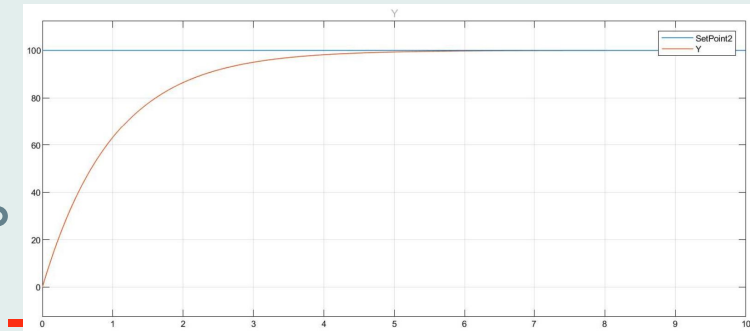
### SERVO



# COMPORTAMENTO DO CONTROLE

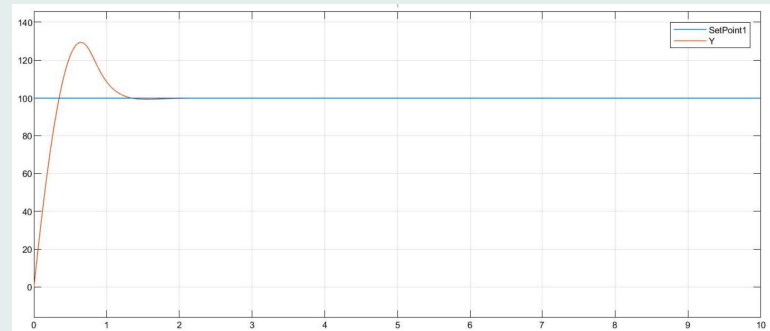
01

CONSERVADOR



02

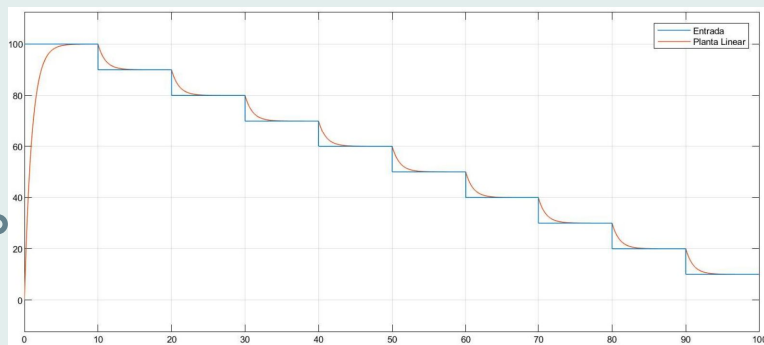
AGRESSIVO



# COMPORTAMENTO DA PLANTA

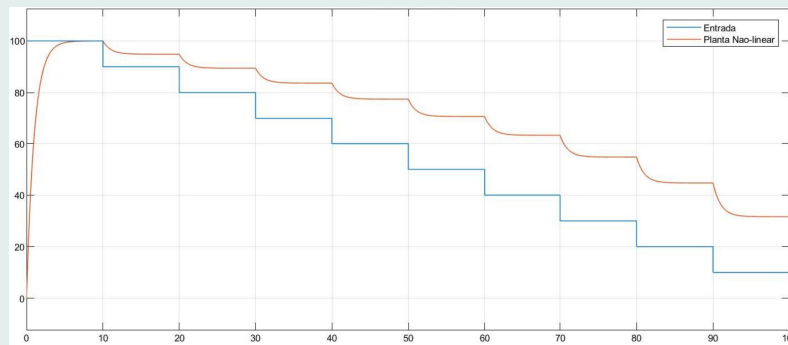
01

LINEAR

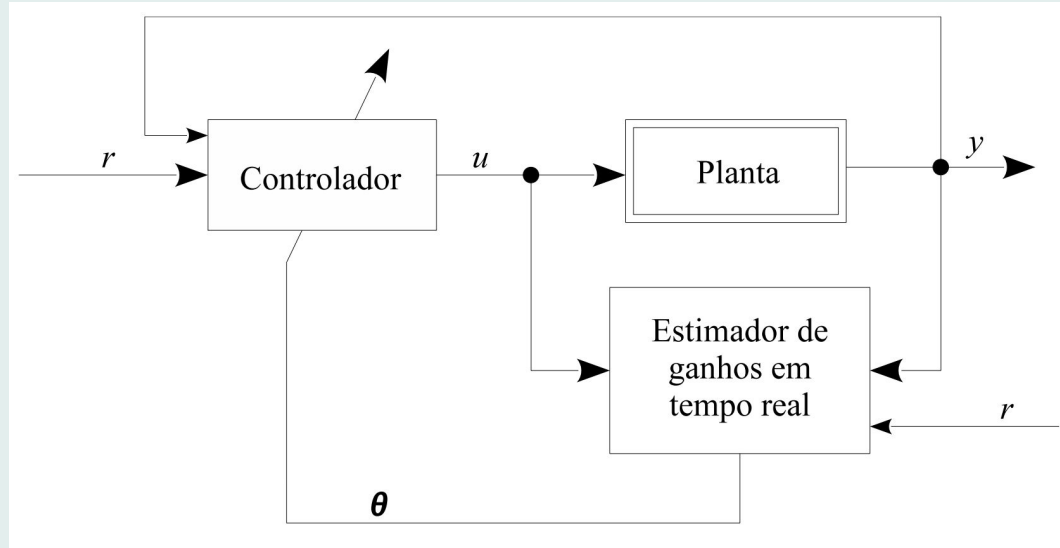


02

NÃO-LINEAR



# Controle adaptativo

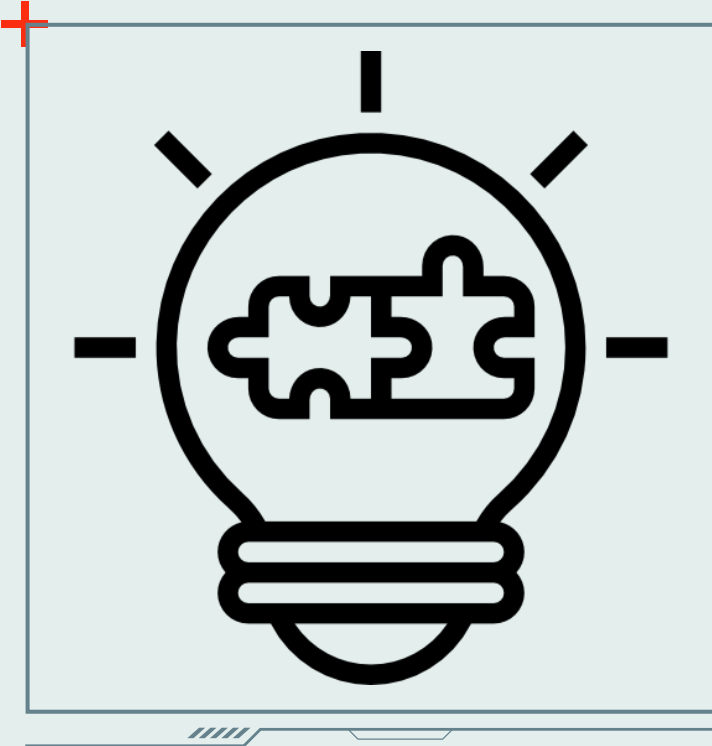






# PROBLEMÁTICA





JUSTIFICATIVA

# OBJETIVO GERAL

- Desenvolver uma biblioteca para uso em dispositivos Arduino
- capaz de implementar o MRAC
- em sistemas de primeira ordem
- disponibilizada GitHub - ciência aberta
- apresentando o seu uso prático em um módulo com motor tacogerador.



# OBJETIVOS ESPECÍFICOS

01



**MRAC**

Entender o MRAC

02



**PROGRAMAÇÃO**

Passar o MRAC da matemática para linguagem de programação

03



**ARDUINO**

Aplicação do MRAC no arduino e em forma de biblioteca

04



**GITHUB**

Disponibilização da biblioteca e toda a pesquisa



# 02

# REFERENCIAL

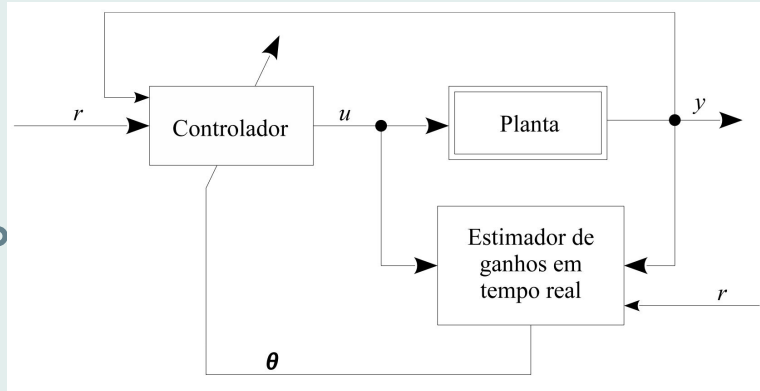
# TEÓRICO

Base teórica e prática para  
o projeto

# FORMAS DE CONTROLE ADAPTATIVO

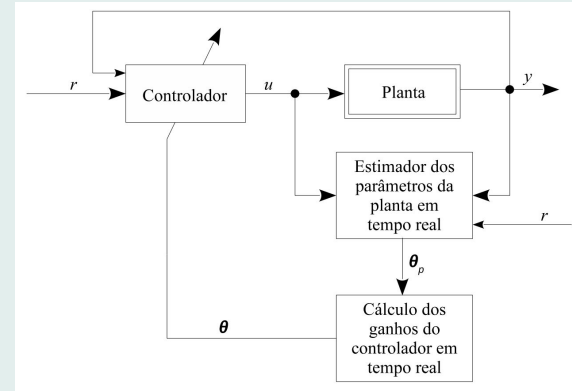
01

DIRETO

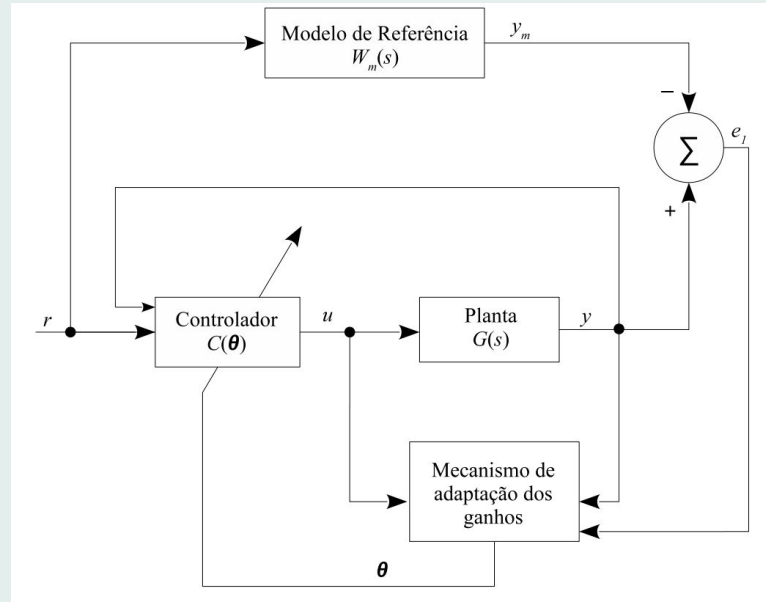


02

INDIRETO



# MRAC - CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA



# VARIAÇÕES DO MRAC

01

## REGRA DO MIT

$$J(\theta) = \frac{e^2}{2}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}$$

$$U(t) = \theta_1 r(t) - \theta_2 y(t)$$

02

## MÉTODO DE LYAPUNOV

Utilizado para garantir a convergência e estabilidade de sistemas com controle adaptativo (SOUZA, 2016)





# MRAC EM OUTRAS ÁREAS

01

**PAWAR E  
PARVAT (2015)**

Pêndulo invertido

02

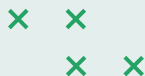
**MUSHIRI  
ET AL. (2017)**

Manufatura aditiva  
(impressão 3D)

03

**CANDY  
(2021)**

Carros autônomos



# MRAC EM MOTORES DC

01

**MANIMOZHI E  
RAJATHI (2021)**

PID + MRAC  
e análise das propriedades  
do motor DC

02

**XIONG E  
FAN (2007)**

PID + MRAC  
e análise da evolução dos  
parâmetros do MRAC

03

**NGUYEN  
ET AL. (2020)**

PID x MRAC  
e análise da resposta do  
controle na mudança da planta

x x  
x x

# ANÁLISE DE PERFORMANCE

01

## ERRO ACUMULADO

Cálculo matemático  
utilizado por Mallick e  
Mondal (2019)

02

## VARIAÇÃO TOTAL

Usado na análise  
quantitativa de variações.

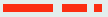


# ERRO ACUMULADO

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$


$$ITSE = \int_0^{\infty} t [e(t)]^2 dt$$

# VARIAÇÃO TOTAL

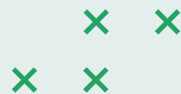
$$V_a^b(f) = \int_a^b |f'(x)| dx$$

$$V_{total} = \sum_{n=2}^j \frac{\theta(n) - \theta(n-1)}{t(n) - t(n-1)}$$





# MÓDULO TACOGERADOR



Fonte: Pedrisch et al. (2022)



03

# DESENVOLVIMENTO

Etapas do desenvolvimento  
da pesquisa



# DA IDE PARA O AMBIENTE DE BIBLIOTECAS ARDUINO

01



## MODULAR

Código original foi separado em módulos

02



## DEFINIÇÃO

#define e informações gerais do objeto

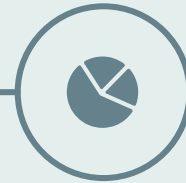
03



## SETUP ()

Opcional mudança e apresentação de parâmetros

04



## LOOP ()

Loop MRAC e opcional mudança e apresentação de dados e parâmetros

# MÉTODOS DA BIBLIOTECA

## REESCRITA DE PARÂMETROS

ModeloGanho()  
ModeloDenominador()  
Modelo()  
Adaptacao()  
SetPoint()

01



## APRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS

02



mostra[função]()

## APRESENTAÇÃO DOS DADOS

plotGrafico()

03

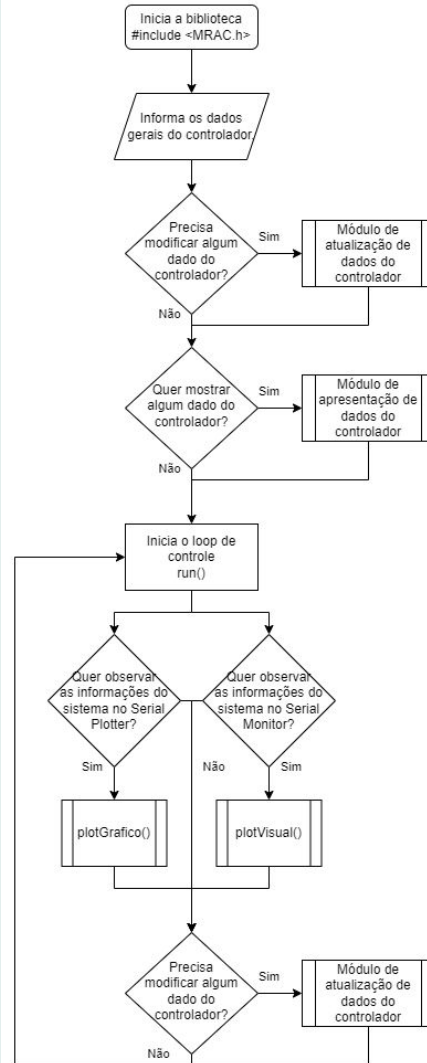


04

plotVisual()



# Fluxograma de uso da biblioteca



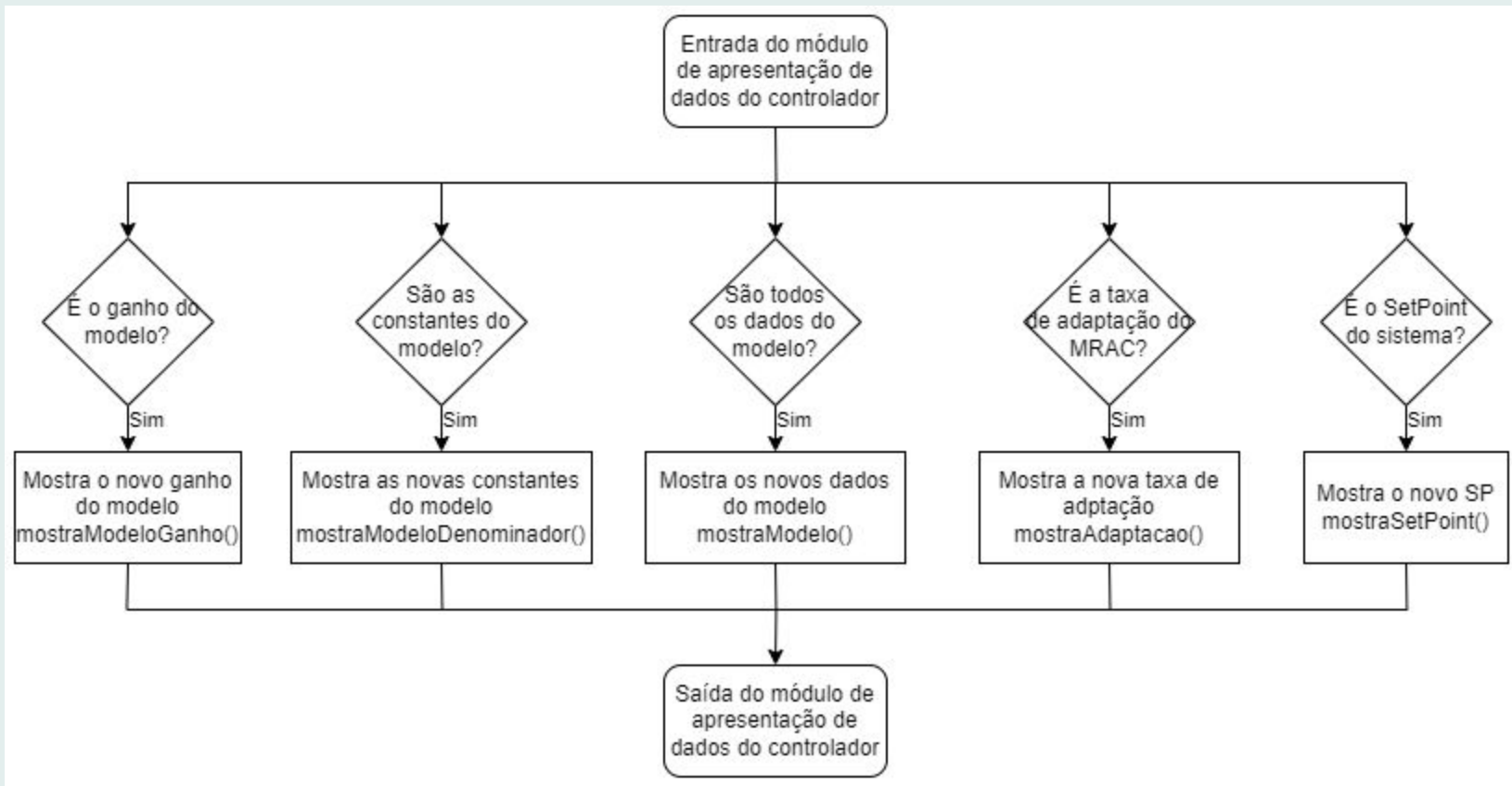
## Dados gerais do controlador:

- Porta para saída PWM;
- Porta para entrada analógica;
- Ganho do modelo (K);
- Constantes da FT do modelo ( $M(s) = K \cdot a/(s+a)$ );
- Taxa de adaptação do sistema;
- SetPoint.

## Informações do sistema:

- SetPoint;
- Saída real (Y);
- Saída do modelo (Ym);
- Sinal de controle (U);
- theta1;
- theta2;
- teto (100);
- chao (0).





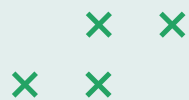


04

# RESULTADOS E CONCLUSÕES

Uso da biblioteca na análise  
do controle por MRAC no  
tacogerador





# LEGENDA DOS GRÁFICOS

Sigla	Variável	Intervalo (%)
SP	SetPoint	0 - 100
Y	Saída real	0 - 100
Ym	Saída modelo	0 - 100
U	Sinal de controle	0 - 100

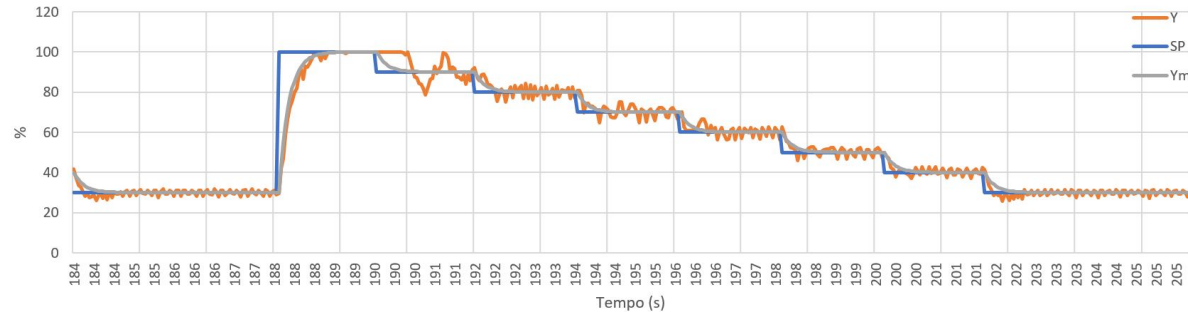
Tabela 1  
Fonte: Autoria própria



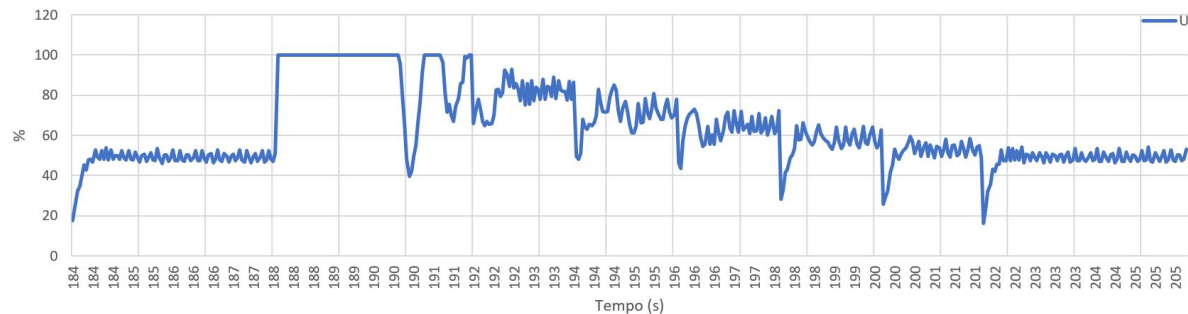
# RASTREAMENTO EM CONTROLE SERVO

Taxa de  
adaptação do  
MRAC =  $10^{-5}$

Resposta do sistema em malha fechada



Sinal de controle

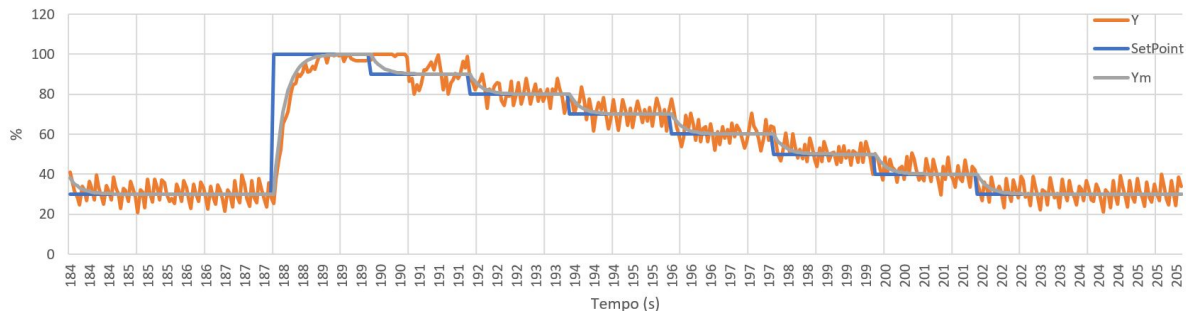




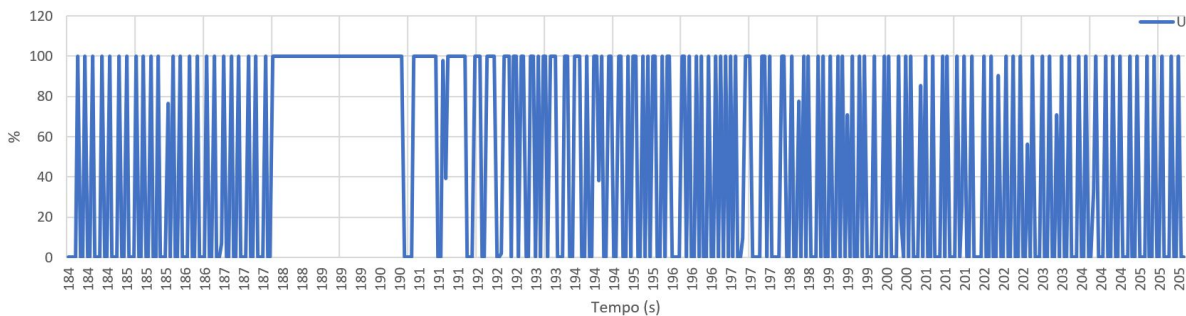
# VARIAÇÃO DA TAXA DE ADAPTAÇÃO

Taxa de adaptação do  
 $MRAC = 10^{-3}$

Resposta do sistema em malha fechada



Sinal de controle

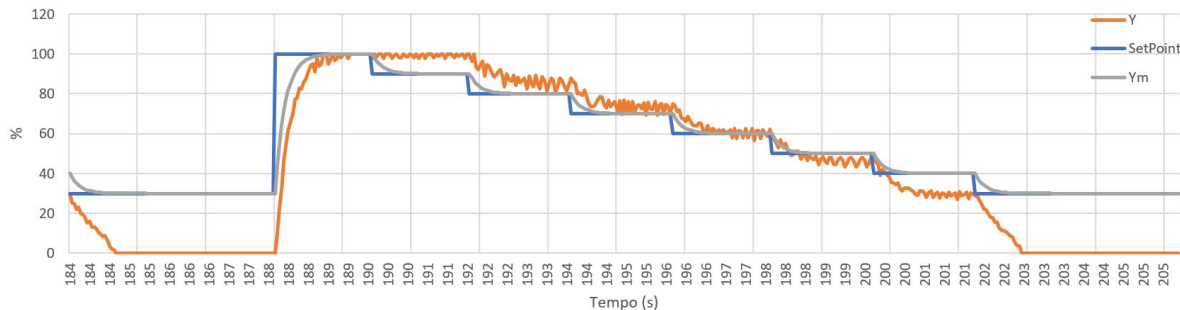




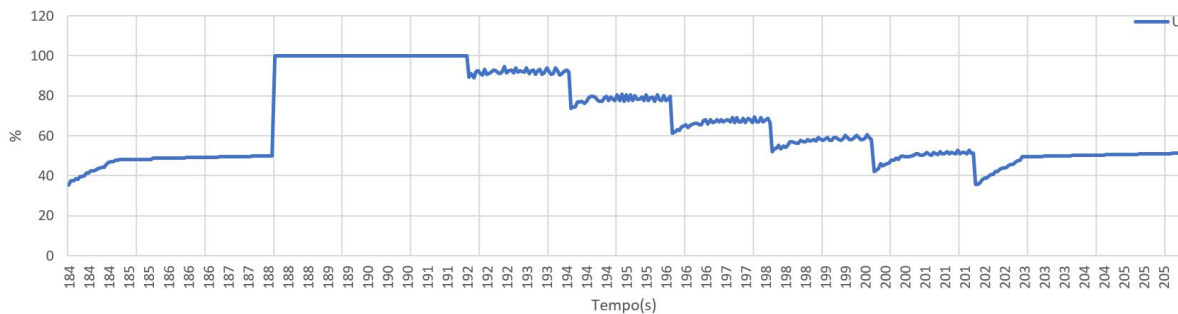
# VARIAÇÃO DA TAXA DE ADAPTAÇÃO

Taxa de adaptação do  
 $MRAC = 10^{-7}$

Resposta do sistema em malha fechada



Sinal de controle





# x x ANÁLISE DE PERFORMANCE

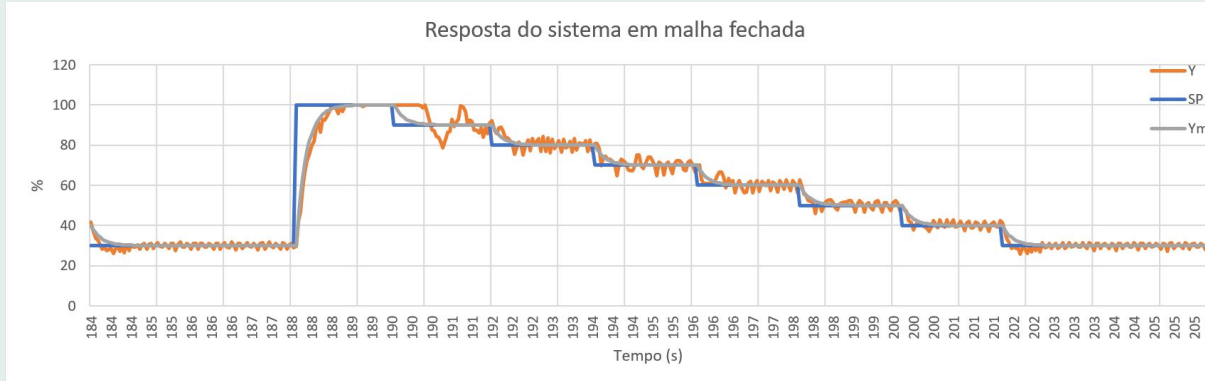
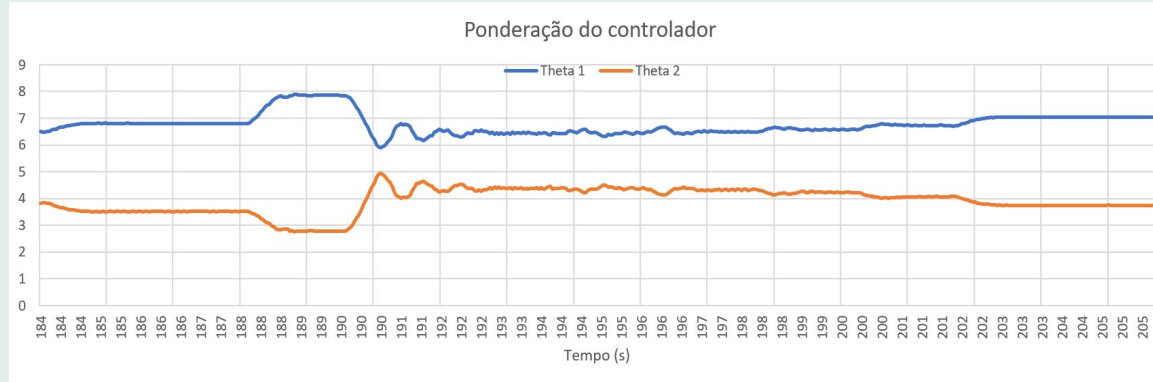
Índice	$\gamma = 10^{-7}$	$\gamma = 10^{-5}$	$\gamma = 10^{-3}$
IAE	6.929,19	1.004,19	1.893,81
ISE	162.871,13	3.799,42	11.172,79
ITAE	1.348.208,82	194.692,04	368.491,22
ITSE	31.694.200,81	731.967,48	2.173.266,78

Tabela 2  
Fonte: Autoria própria

$$U(t) = \theta_1 r(t) - \theta_2 y(t)$$

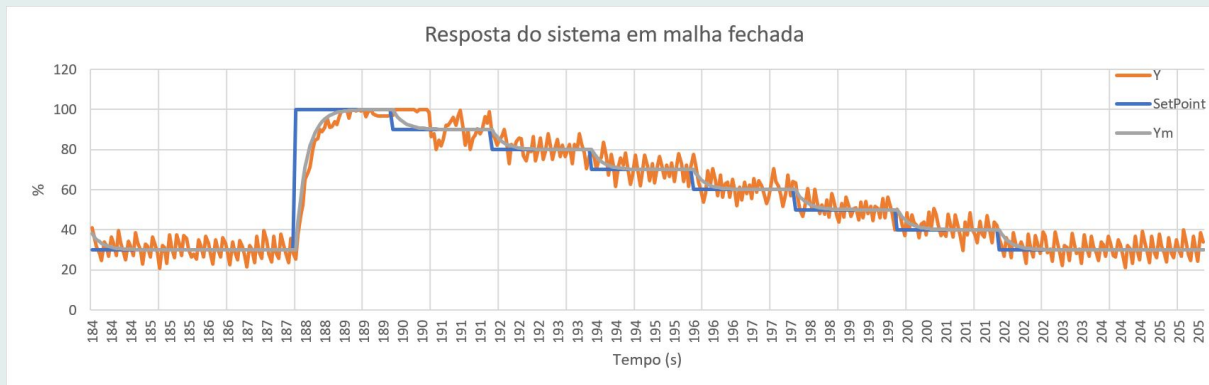
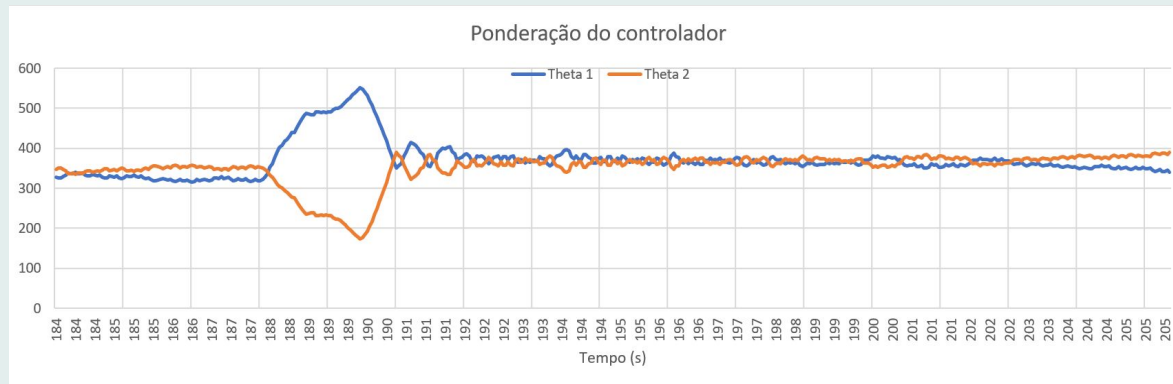
# PONDERAÇÃO DO CONTROLADOR

Taxa de  
adaptação do  
MRAC =  $10^{-5}$



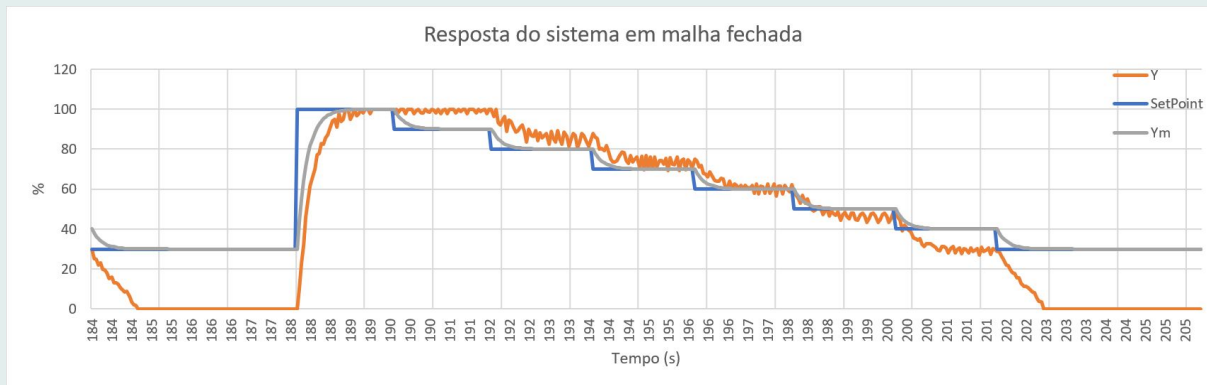
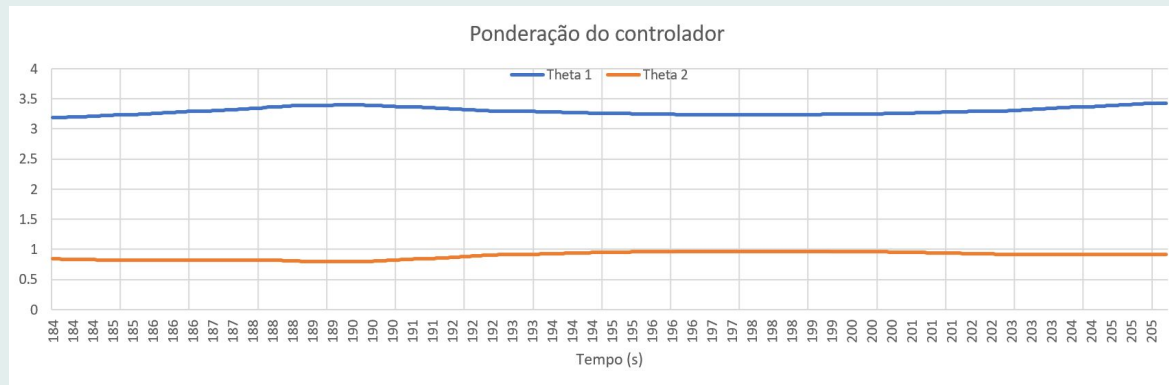
# PONDERAÇÃO DO CONTROLADOR

Taxa de  
adaptação do  
MRAC =  $10^{-3}$



# PONDERAÇÃO DO CONTROLADOR

Taxa de  
adaptação do  
MRAC =  $10^{-7}$





# VARIAÇÃO TOTAL

$\gamma$	VT $\theta_1$	VT $\theta_2$
$10^{-7}$	12,91	5,92
$10^{-5}$	283,73	278,064
$10^{-3}$	43.655,22	43.663,56

Tabela 3  
Fonte: Autoria própria



# GITHUB



SCAN ME



# CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recapitulando...

Além do objetivo educativo, essa biblioteca pode servir de base/direcionamento para pessoas que queiram desenvolver novos trabalhos, seja para educação seja para projetos práticos





# MELHORIAS FUTURAS

01

## ESTUDO APROFUNDADO

Estudo focado na influência e decisão da taxa de adaptação no MRAC

x x  
x x

02

## EXPANSÃO PELO MRAC

Aumentar o uso da biblioteca para aplicar o MRAC indireto e/ou pelo método de Lyapunov

03

## EXPANSÃO PELO CONTROLE ADAPTATIVO

Criação de novas bibliotecas implementado diferentes métodos de controle adaptativo



# REFERÊNCIAS

- Arduino (2021). About arduino. URL <https://www.arduino.cc/en/about>. Ultimo acesso em: 06 de Dez. ´ de 2022.
- Astrom, K. (1987). Adaptive feedback control. Proceedings of the IEEE, 75, 185–217.
- Astrom, K. and Wittenmark, B. (1995). Adaptive Control. Addison-Wesley, Mineola
- Bruce, J. (2021). Indirect Model Reference Adaptive Control with online aircraft parameter estimation. Master's thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Fl.

# REFERÊNCIAS

- Callai, T., Coelho, A., and Coelho, L. (2007). Controle nebuloso adaptativo por modelo de referência: projeto e aplicação em sistemas não-lineares. Controle & Automação, 18, 479–489.
- Campos, M. and Teixeira, H. (2010). Controles típicos de equipamentos e processos industriais. Edgard Blucher Ltda., São Paulo
- Candy, J. (2021). Model reference adaptive control (mrac) for additive manufacturing. Technical report, Lawrence Livermore National Laboratory
- Evans, M., Noble, J., and Hochenbaum, J. (2013). Arduino em ação. Novatec, São Paulo

# REFERÊNCIAS

- Fischman, A. (1993). Controle robusto de sistemas lineares incertos - teoria e aplicações. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Jordan, C. (1881). On Fourier series. C. R. Acad. Sci., Paris, 92, 228–230.
- Kreisselmeier, G. and Anderson, D. (1986). Robust model reference adaptive control. Transactions on automatic control, 31, 127–133.
- Mallick, S. and Mondal, U. (2019a). Comparative performance study of lyapunov based mrac technique and mrac augmented with pid controller for speed control of a dc motor. International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP), 2.

# REFERÊNCIAS

- Mallick, S. and Mondal, U. (2019b). Performance study of different model reference adaptive control techniques applied to a dc motor for speed control. International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 3, 770–774.
- Manimozhi, M. and Rajathi, A. (2021). Design of mrac and modified mrac for dc motor speed control. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications, 12, 1863–1871.
- Mushiri, T., Mahachi, A., and Mbohwa, C. (2017). A model reference adaptive control (mrac) system for the pneumatic valve of the bottle washer in beverages using simulink. International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, 364–373.

# REFERÊNCIAS

- Nguyen, M., Vuong, D., and Nguyen, T. (2020). The mrac based - adaptive control system for controlling the speed of direct current motor. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 19, 723–728.
- Pawar, R. and Parvat, B. (2015). Design and implementation of mrac and modified mrac technique for inverted pendulum. International Conference on Pervasive Computing (ICPC).
- Pedrisch, R.O., Souza, A.M.M.C.d., Marinho, A.L.B., Santos, A.V.A., and Luna, J.D.F.d.O. (2022). Um módulo motor-tacogerador de baixo custo para ensino de controle automático. In Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2022, volume 1.

# REFERÊNCIAS

- Sapiee, M. and Sudin, S. (2010). Road vehicle following system with adaptive controller gain using model reference adaptive control method. International Journal of Simulation, Systems, Science & Technology (IJSSST), 11, 24–32.
- Silva, M. (2017). Controle Adaptativo Aplicado a um Veículo Aéreo Não Tripulado. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Souza, R. (2016). Estratégia de controle adaptativo para estabilização de um quadricóptero na presença de variação de massa. Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

# REFERÊNCIAS

- Tambara, R. (2018). Apostila didática: Teoria básica de controle adaptativo com exercícios resolvidos. URL <https://bityli.com/NYA4z>. Último acesso em: 16 de  Ago. de 2022.
- Trofino, A. (ano). Sistemas lineares. Material didático da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em [https://www.academia.edu/19191808/Apostila\\_Sistemas\\_Lineares](https://www.academia.edu/19191808/Apostila_Sistemas_Lineares). Último acesso em: 16 de Ago. de  2022.
- Xiong, A. and Fan, Y. (2007). Application of a pid controller using mrac techniques for control of the dc electromotor drive. International Conference on Mechatronics and Automation, 2616–2621.





**INSTITUTO  
FEDERAL**

Rondônia

*Campus*  
Porto Velho Calama

# OBRIGADO!

**Possui alguma dúvida?**

[juan.victor73x@gmail.com](mailto:juan.victor73x@gmail.com)

+55 (69) 99381-4774

CRÉDITOS: Este modelo de  
apresentação foi criado por **Slidesgo**,  
incluindo os ícones por **Flaticon**,  
infográficos e imagens por **Freepik**.

Please keep this slide for attribution

# MRAC NA LITERATURA

01

**KREISSELMEIER  
E ANDERSON  
(1986)**

Artigo extremamente  
referenciado na área

02

**ASTROM E  
WITTENMARK  
(1995)**

Livro completo sobre  
controle adaptativo

03

**RODRIGO  
TAMBARA  
(2018)**

Apostila didática sobre  
MRAC

x x  
x x

+

# MRAC APLICADO NO MATLAB

01



**TAMBARA  
(2018)**

Apostila didática  
base

02



**MRAC**

Método de  
controle adaptativo  
escolhido

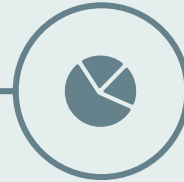
03



**PRIMEIRA  
ORDEM**

Dinâmica do  
módulo  
tacogerador

04



**MATLAB**

MRAC no Matlab

# ADAPTAÇÃO DO CÓDIGO DE MATLAB PARA ARDUINO

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + a}$$

$$\tau s Y(s) + a Y(s) = K U(s)$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\left(\frac{K a T_s}{\tau}\right)}{z + \left(-1 + \frac{a T_s}{\tau}\right)}$$

# × LÍMITAÇÃO FÍSICA DO MÓDULO

Resposta do sistema em malha fechada

