



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
ENG10019 - Sistemas de Controles Digitais

# Projeto de controlador PID pelo método VRFT

Autores:  
Eduardo D. Brezolin  
Vitor A. de Carvalho



Ministrante:  
Dr. Alexandre S. Bazanella

# DESCRIÇÃO DO PROJETO



## Operação

- Executar saltos de 5 Volts, pico a pico

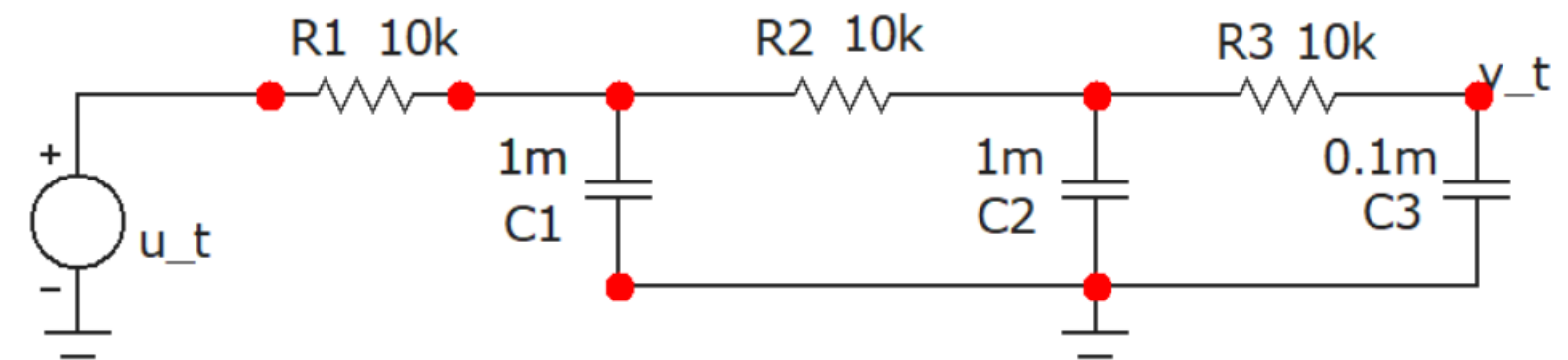
Limite inferior 2,5 Volts

Limite superior 7,5 Volts

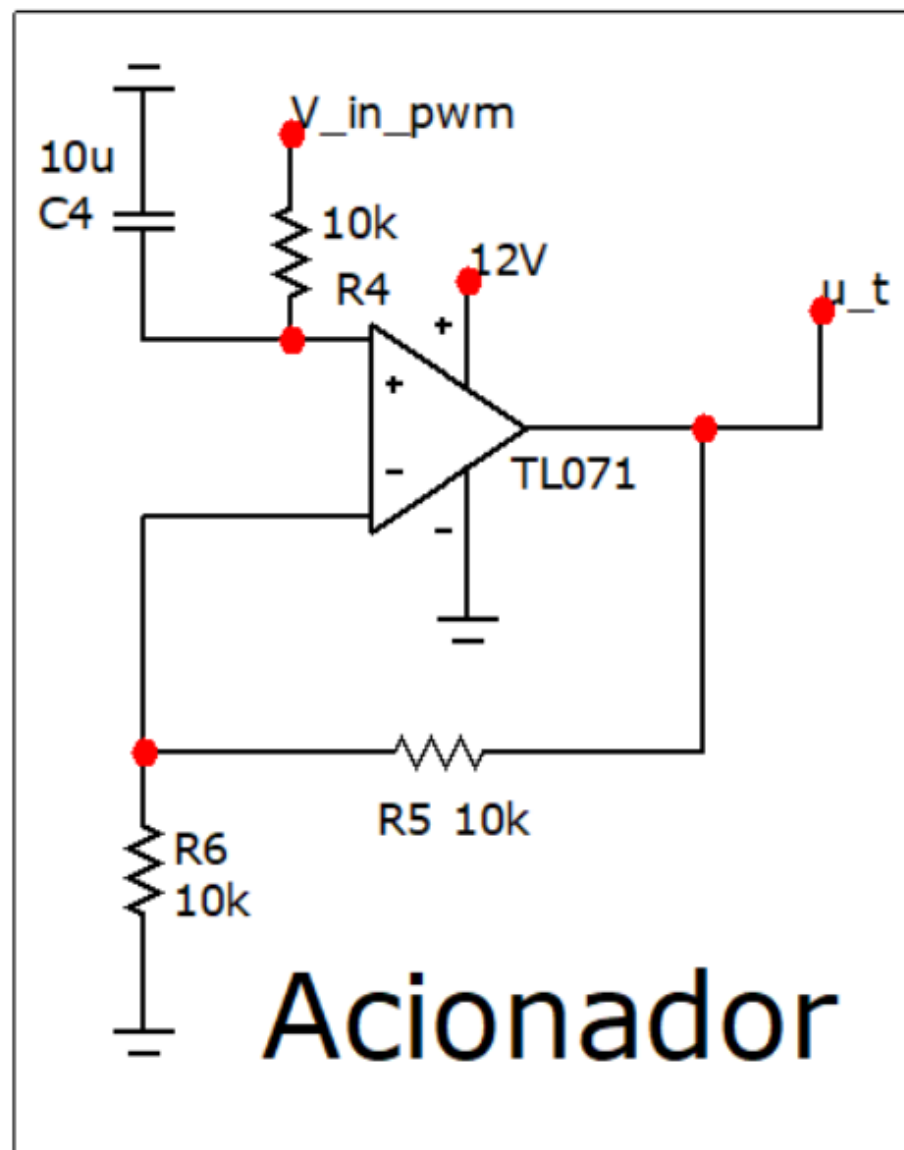
## Requisitos

- Erro nulo em regime permanente
- Sobrepasso inferior a 10%.
- Tempo de acomodação em MF inferior ao tempo em MA

## Planta





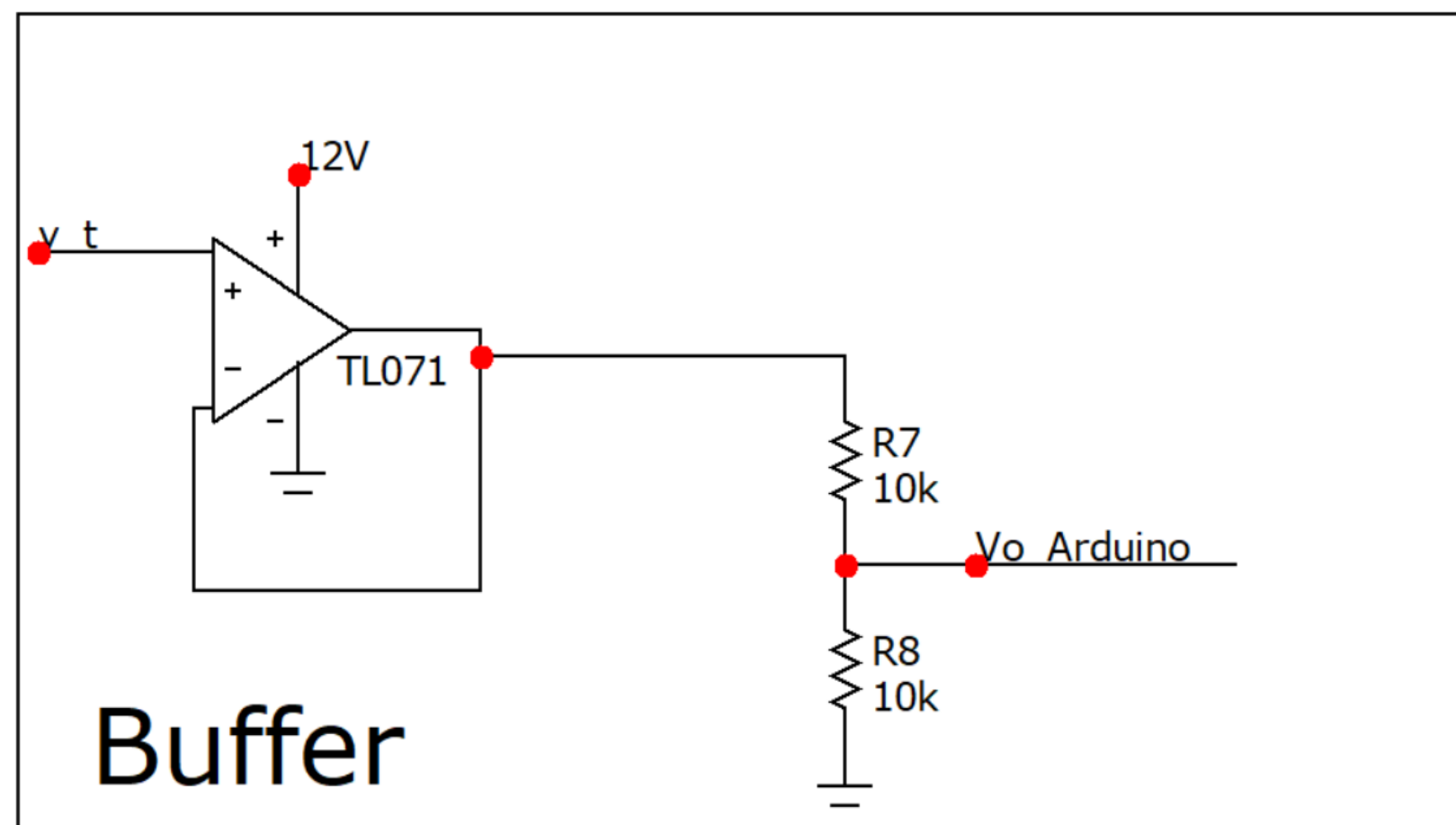


## Considerações

- Filtro RC na entrada não inversora
- Ganho 2
- Sinal de saída (0 – 10 Volts)

## Considerações

- Buffer de tensão
- Divisor de tensão resistivo
- Sinal de saída (0 – 5 Volts)



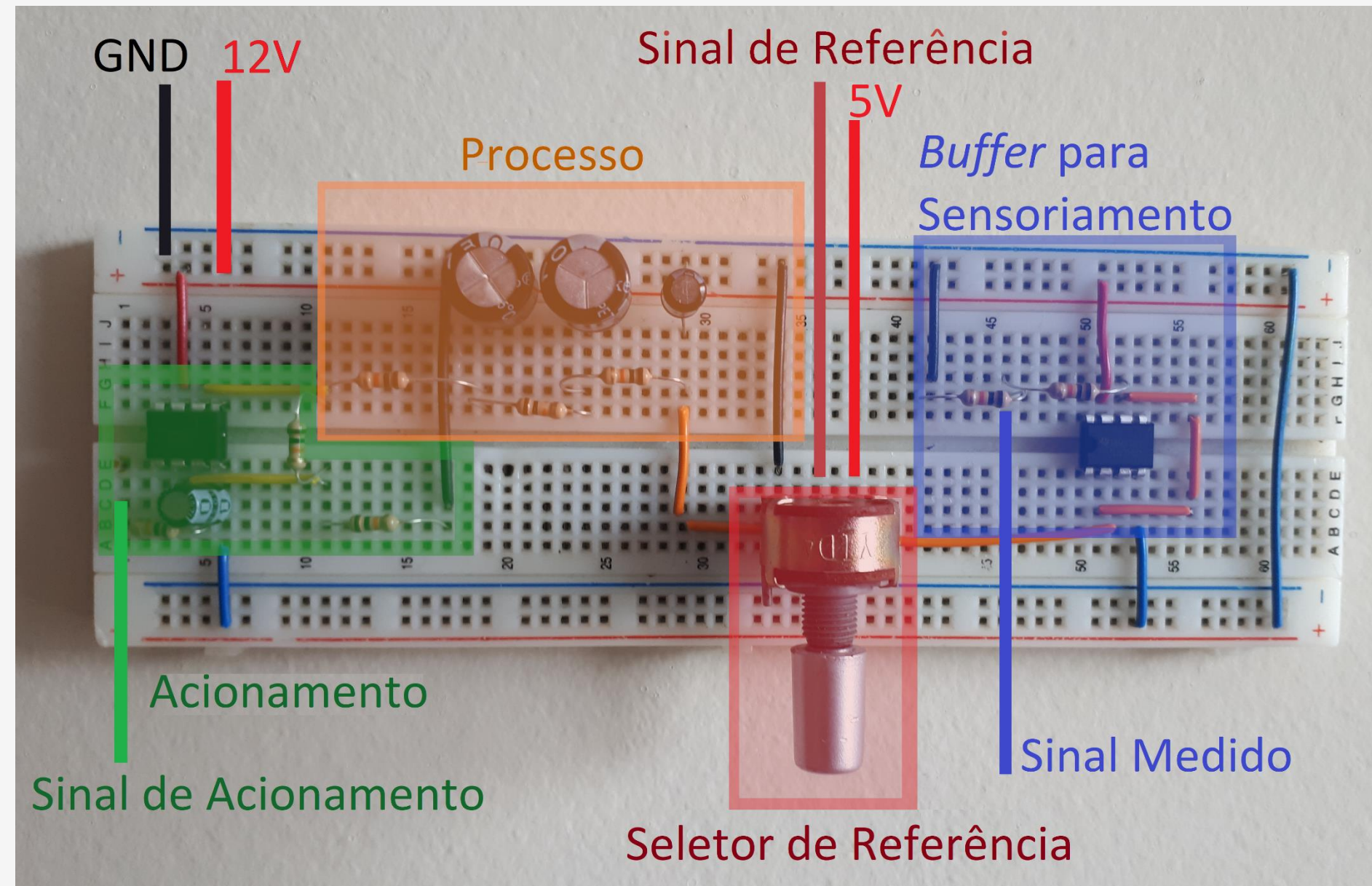
# Circuito real

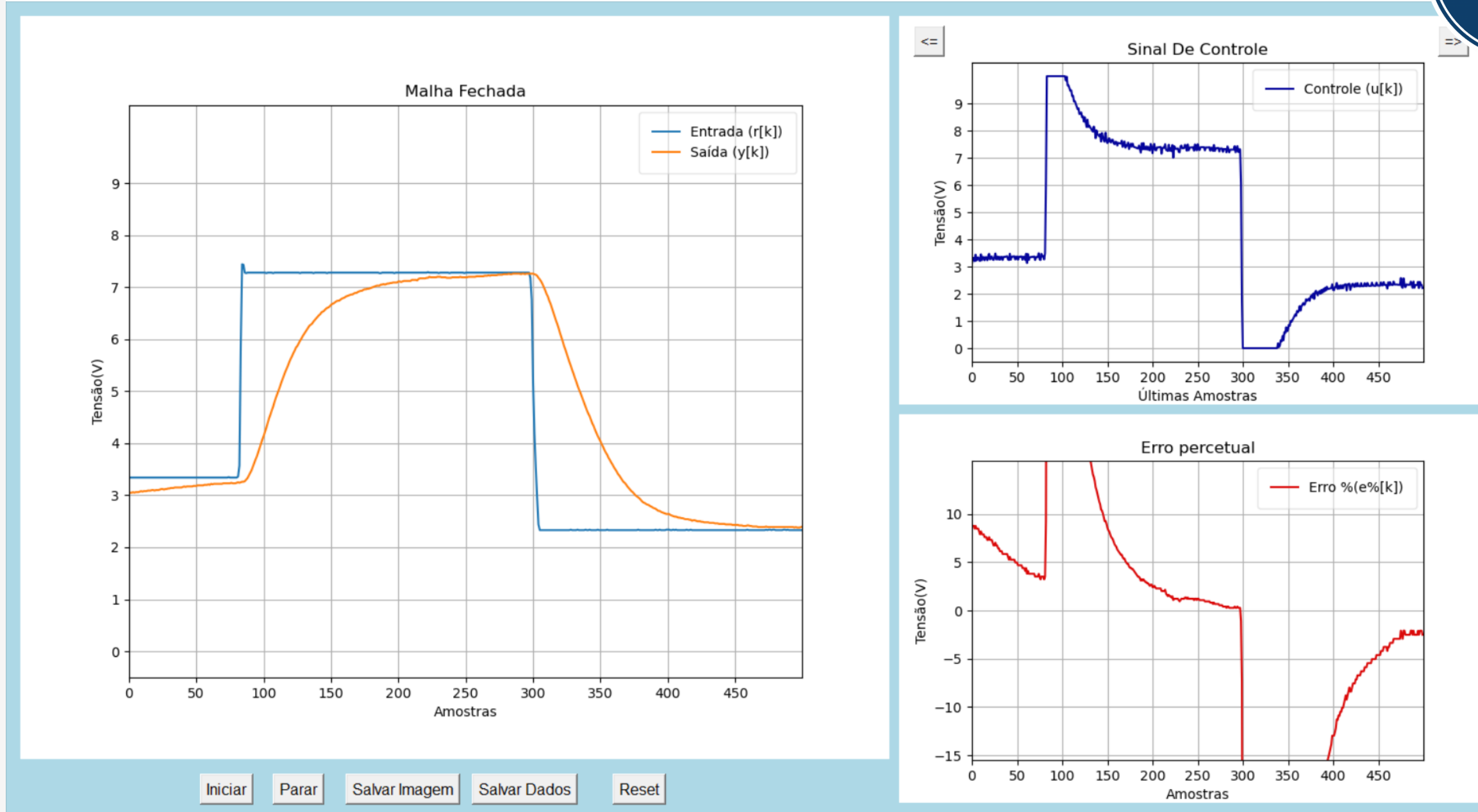
## Conexões

- Sinal de acionamento: pino 8
- Sinal de referência: pino A15
- Sinal medido: pino A7

## Componentes

- 8 resistores 10k Ohms – 5%
- 2 capacitores 1 mF – 10%
- 1 capacitor 0,1 mF – 10%
- 1 capacitor 10  $\mu$ F – 10%
- 2 operacionais TL071CP
- 1 potenciômetro 50k Ohms

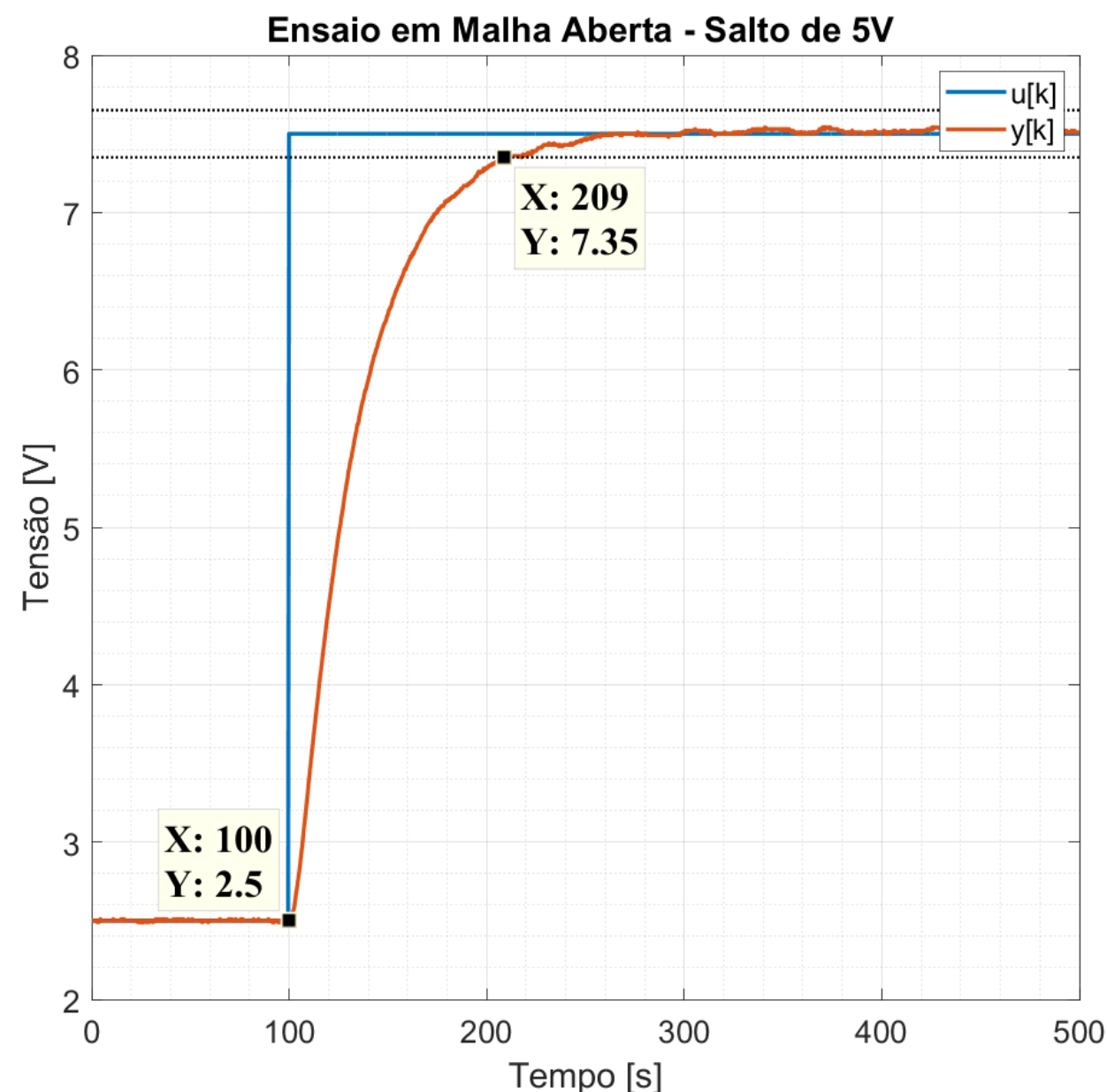




## CONSIDERAÇÕES:

- Feito em Python
- Visualização em tempo real
- Monitoramento dos sinais de controle e sinal de erro
- Possibilita salvar gráfico e dados



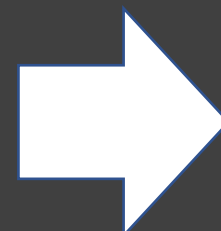


## Resposta ao salto

- Tensão inicial de 2,5 Volts
- Salto de 5 Volts aplicado em 100 segundos
- Tempo de acomodação em MA de 109 segundos
- Tempo teórico de acomodação em MA de 115 segundos

## Considerações

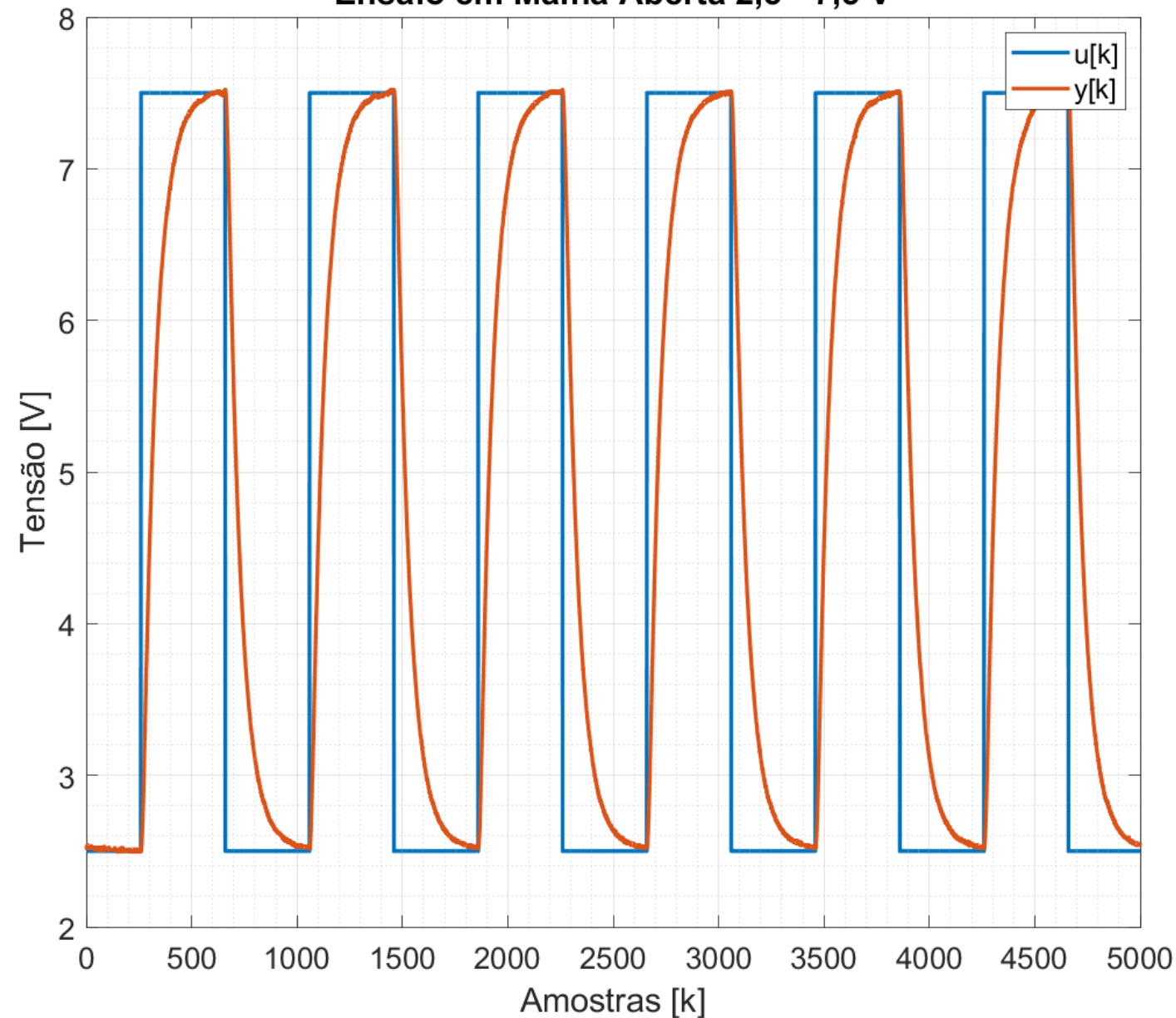
- Tempos de acomodação teórico e prático próximos (5% de erro)
- Polo lento em  $-0,0367$  rad/s



TEMPO DE AMOSTRAGEM DEFINIDO:

**500 ms**

Ensaio em Malha Aberta 2,5 - 7,5 V



## Resposta a onda quadrada

- Tensão inicial de 2,5 Volts
- Onda com tensão de pico a pico de 5 Volts (2,5 a 7,5 Volts)
- Período de 1000 amostras

## Considerações:

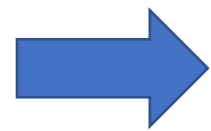
Dados coletados nesse ensaio serão utilizado para o projeto do controlador.



# Aplicação do método VRFT

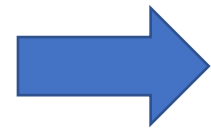


Função de primeira ordem



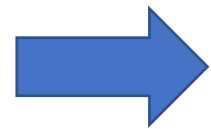
Sobrepasso 0%

Tempo de acomodação desejado de 60 segundos



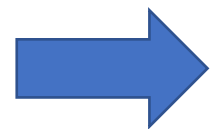
Polo aproximadamente em 0,07 rad/s

Discretização



$$T_d(z) = \frac{1 - c}{z - c} \implies T_d(z) = \frac{0,03434}{z - 0,9656}$$

Definição da estrutura do controlador

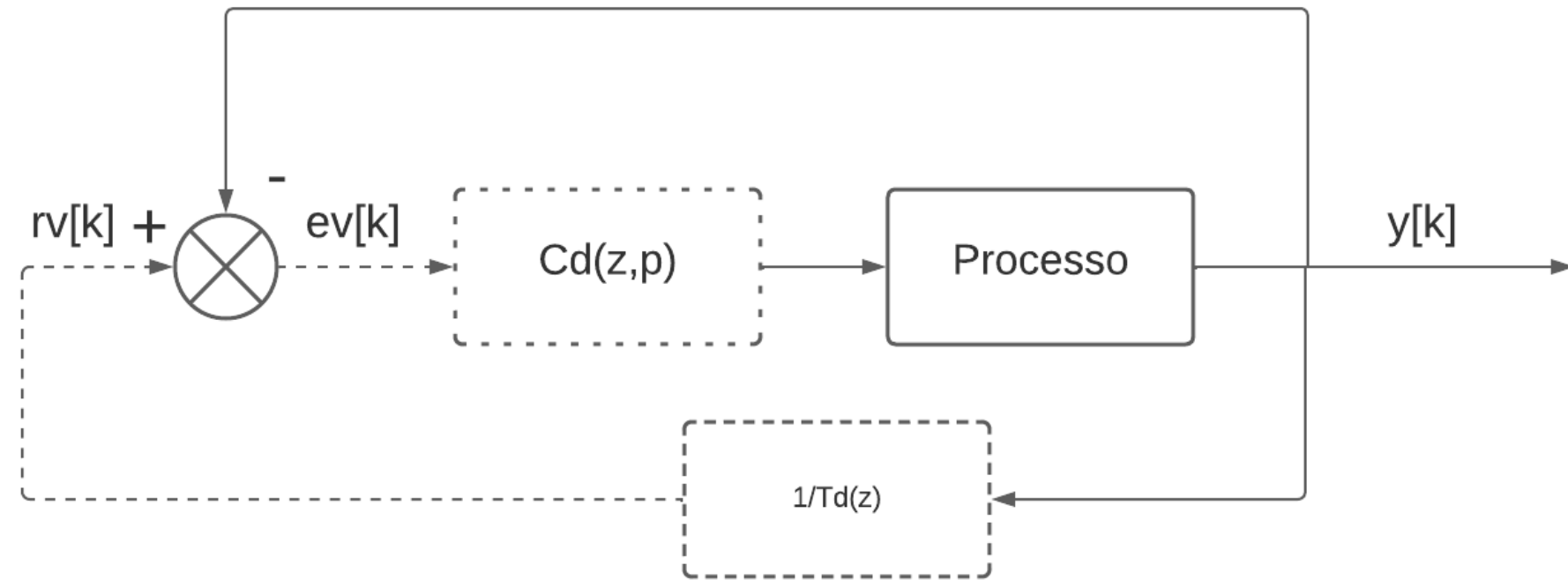


$$C_d(z, \rho) = K_d + K_i \cdot \frac{z}{z - 1} + K_d \cdot \frac{z - 1}{z}$$

Definição do vetor de parâmetros



$$\rho^T = [K_p \quad K_i \quad K_d]$$



# Aplicação do método VRFT



Definição da referência e erro virtual

$$r_v[k] = Td(z)^{-1} y[k]$$

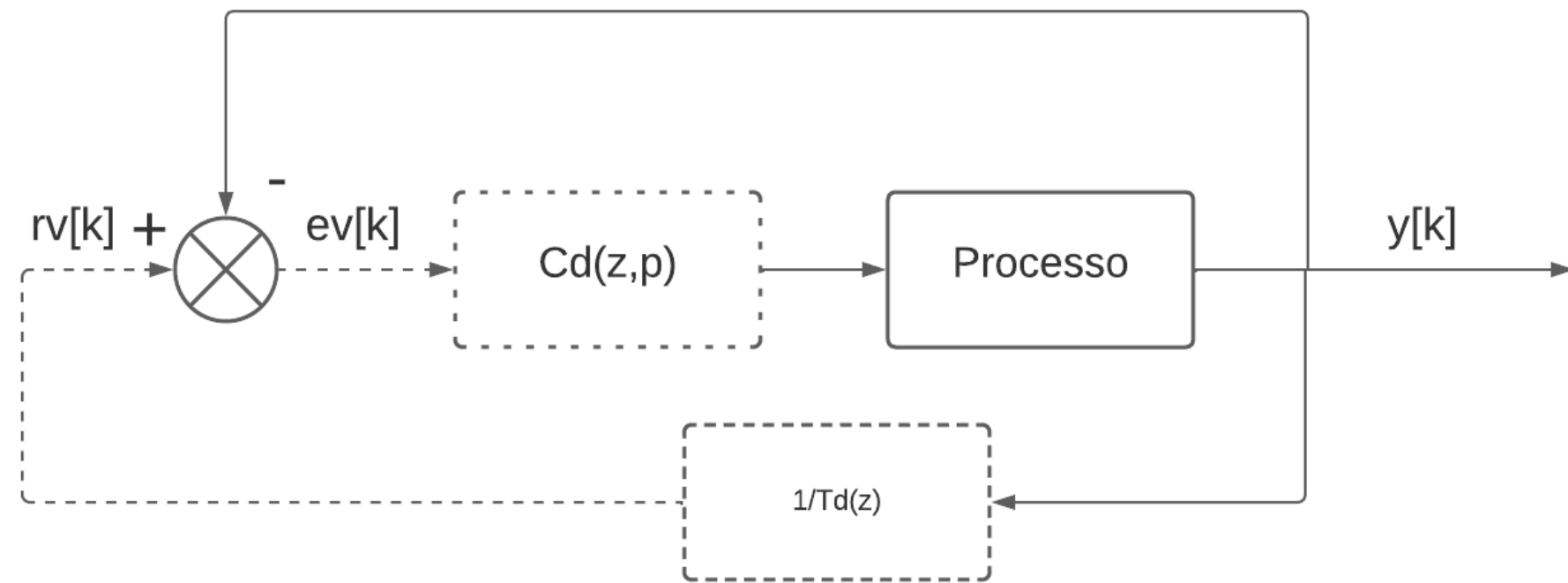
$$e_v[k] = r_v[k] - y[k]$$

Função de custo que a ser minimizada

$$J^{VR}(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u[k] - (C(z, \rho) \cdot e_v[k])]^2$$

Sendo o  $\rho$  que minimiza a função dado por

$$\rho = \sum_{k=1}^N [\varphi[k] \varphi^T[k]]^{-1} \sum_{k=1}^N [\varphi[k] u[k]]$$



Com  $\varphi$  (vetor regressor):

$$\varphi[k] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z}{(z-1)} & \frac{z-1}{(z)} \end{bmatrix}^T \cdot e_v[k]$$

# Parâmetros obtidos

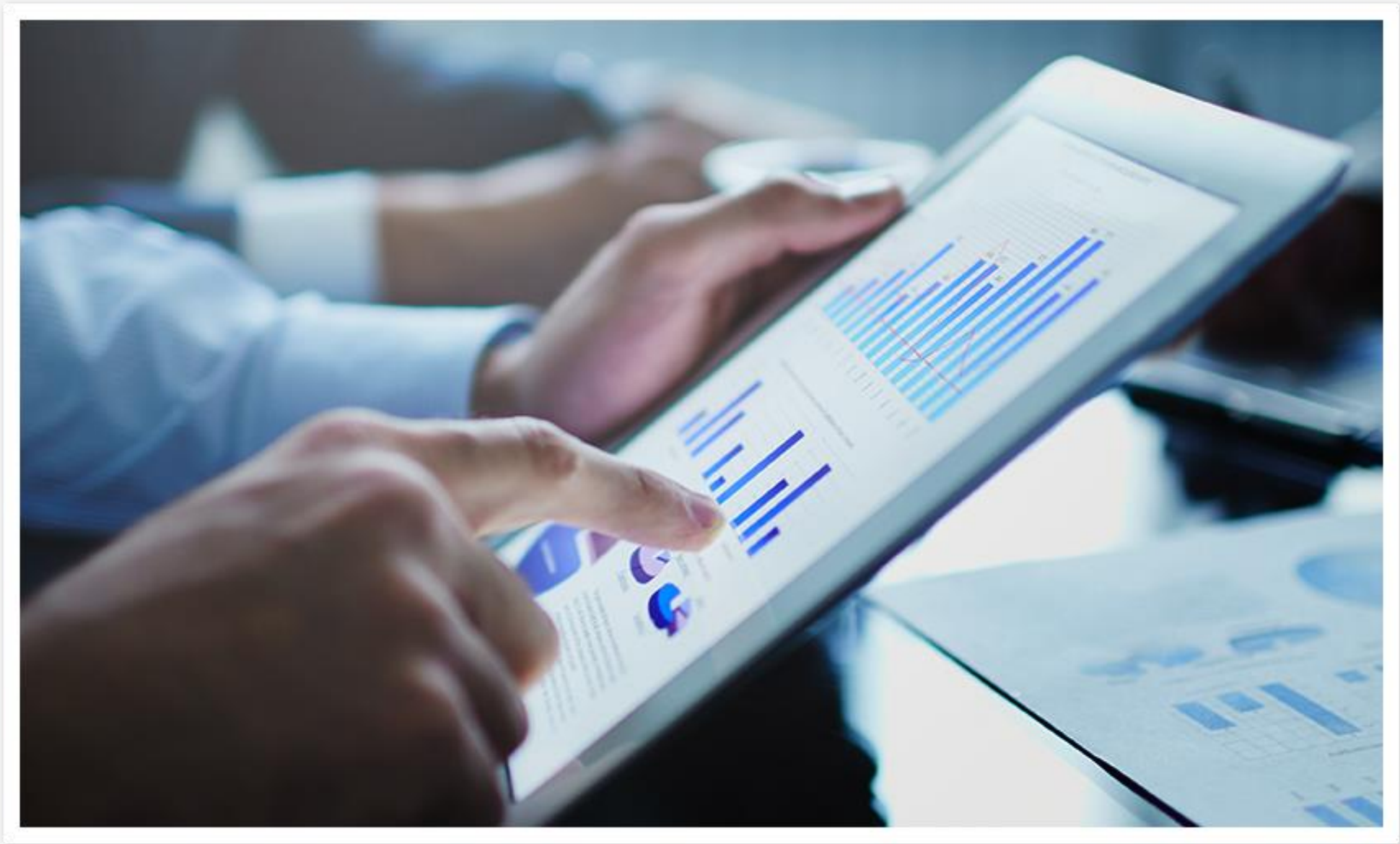


## Parâmetros do controlador

$$K_p = 2,34778$$

$$K_i = 0,03262$$

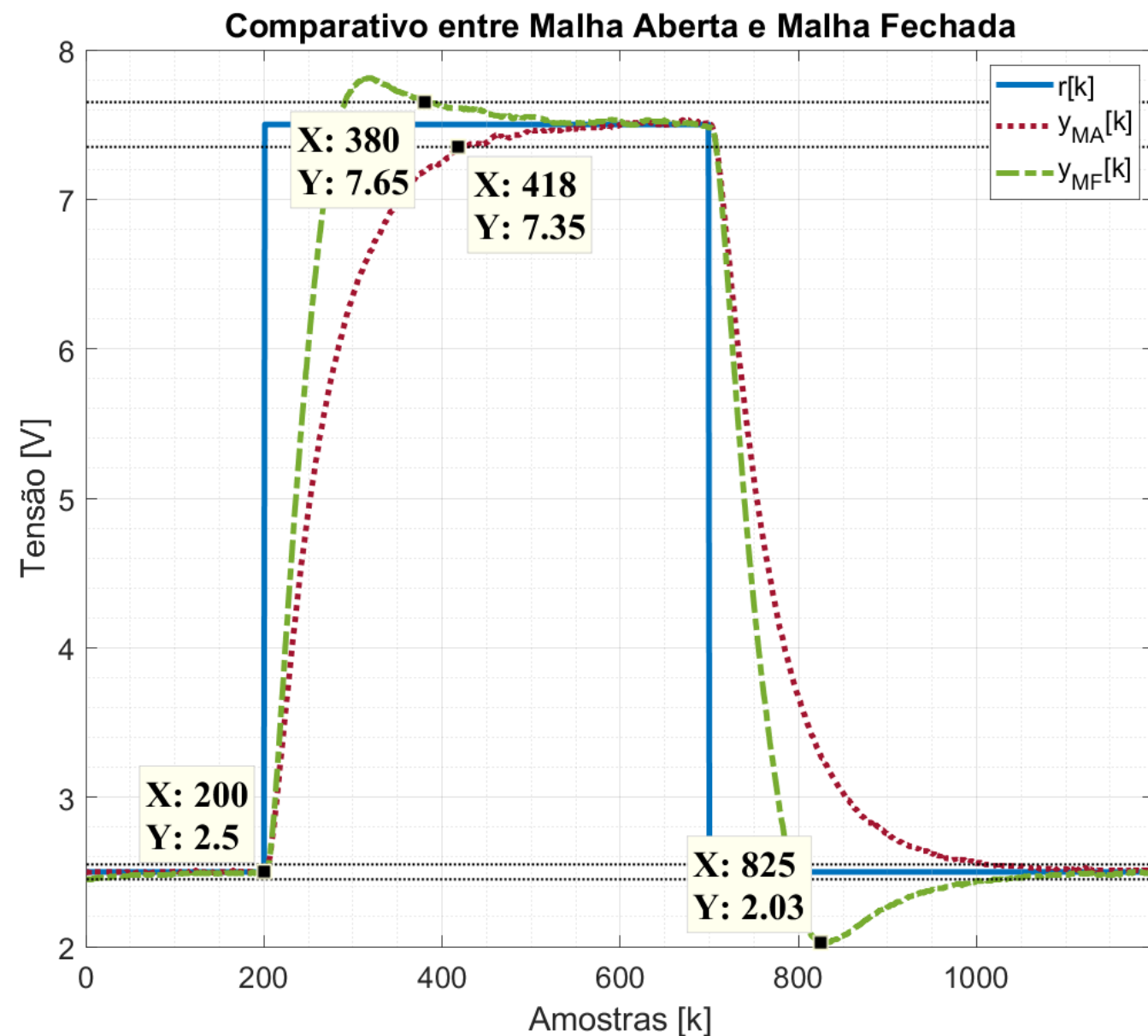
$$K_d = 10,39821$$



Custo por amostra

$$J^{VR} = 0,0661$$





## Resposta a um pulso quadrado

- Tensão inicial de 2,5 Volts
- Salto de 5 Volts aplicado em  $k = 200$
- Salto de -5 Volts aplicado em  $k = 700$

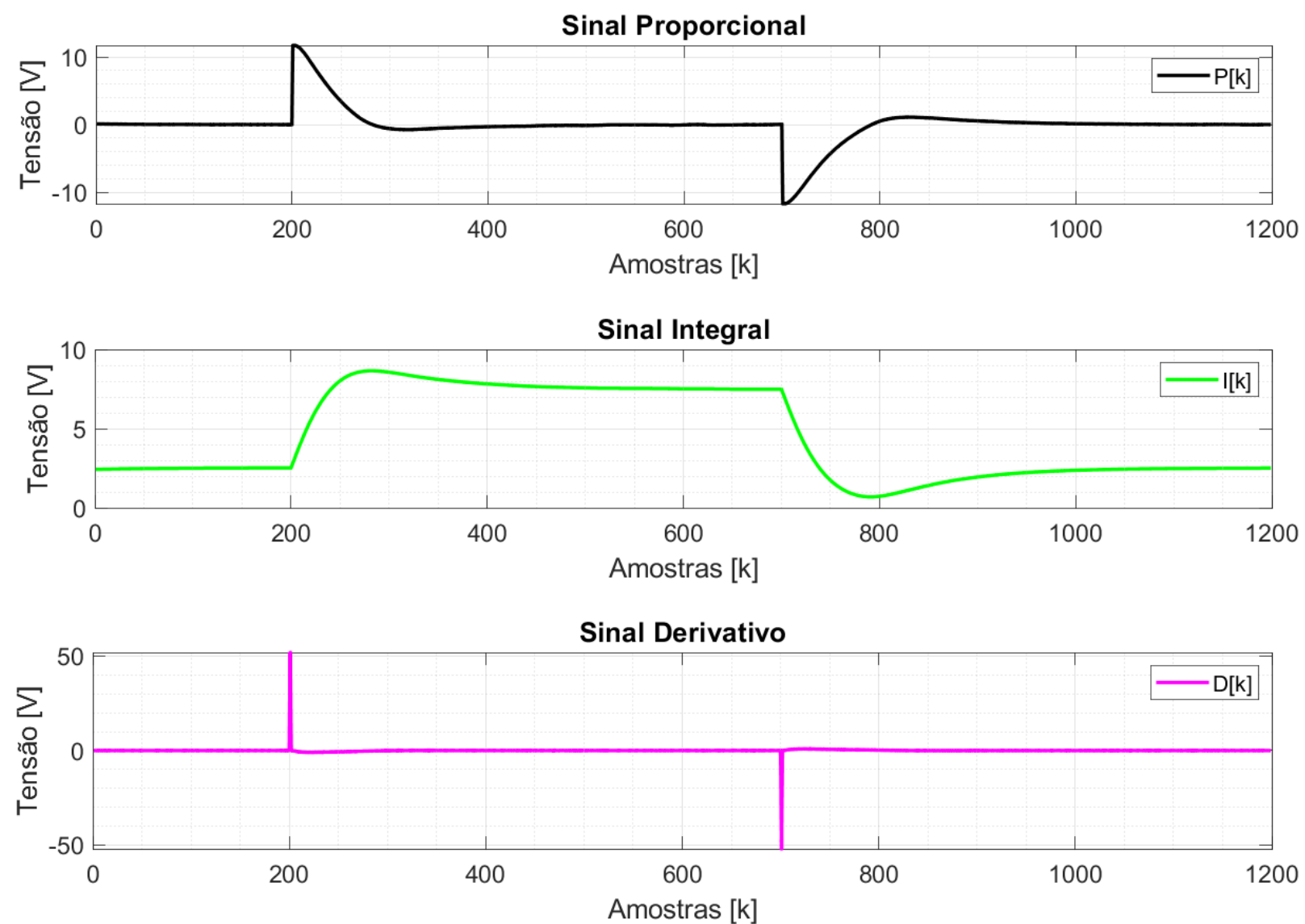
## Considerações:

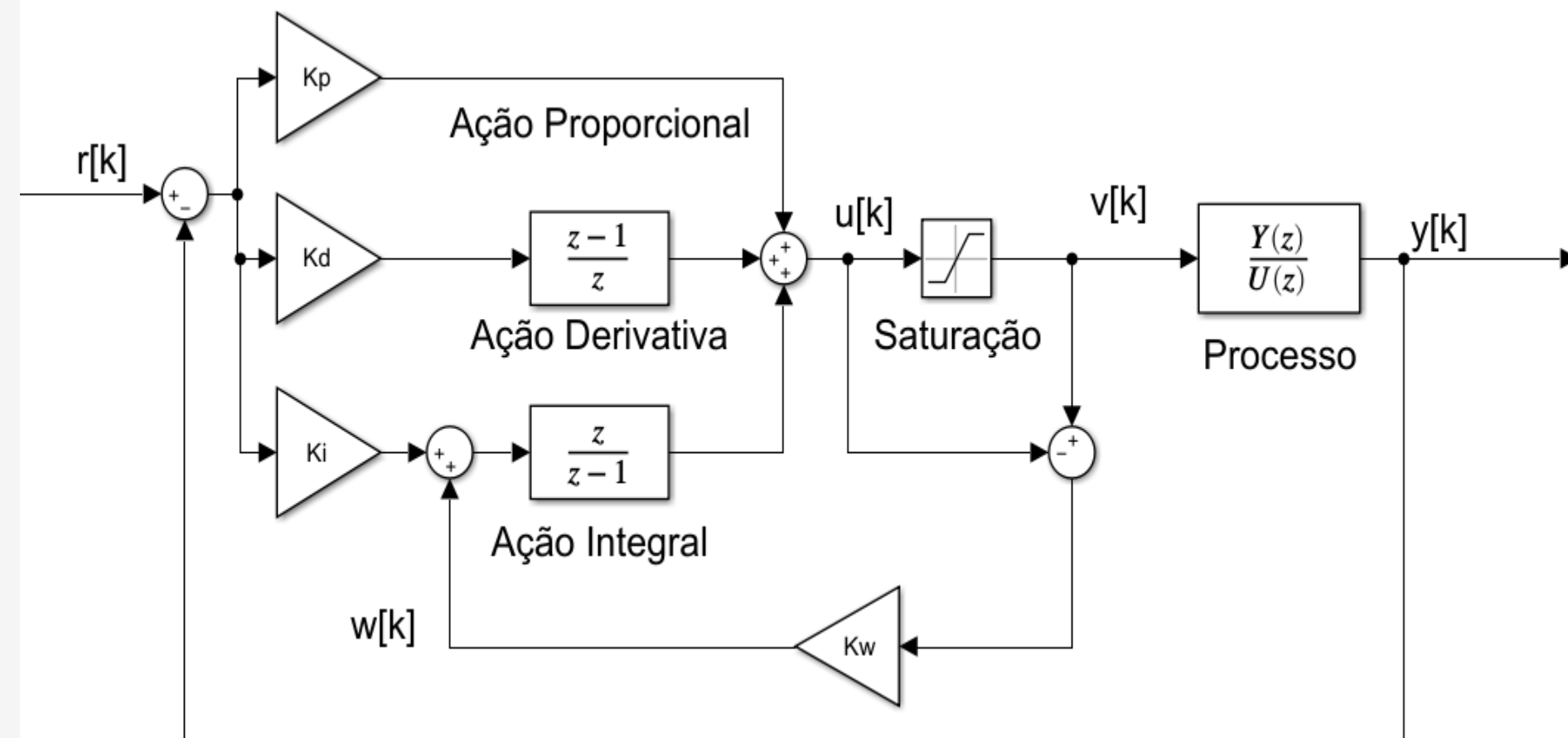
- Sobrepasso não esperado
- Acomodação superior a esperada
- Resposta ao salto negativo deteriorada
  - Sobrepasso acima do aceitável

## Análise dos sinais de controle

- Sobrecarga positiva e negativa da ação integral
- Saturação do acionador

Problema de *Wind-up*



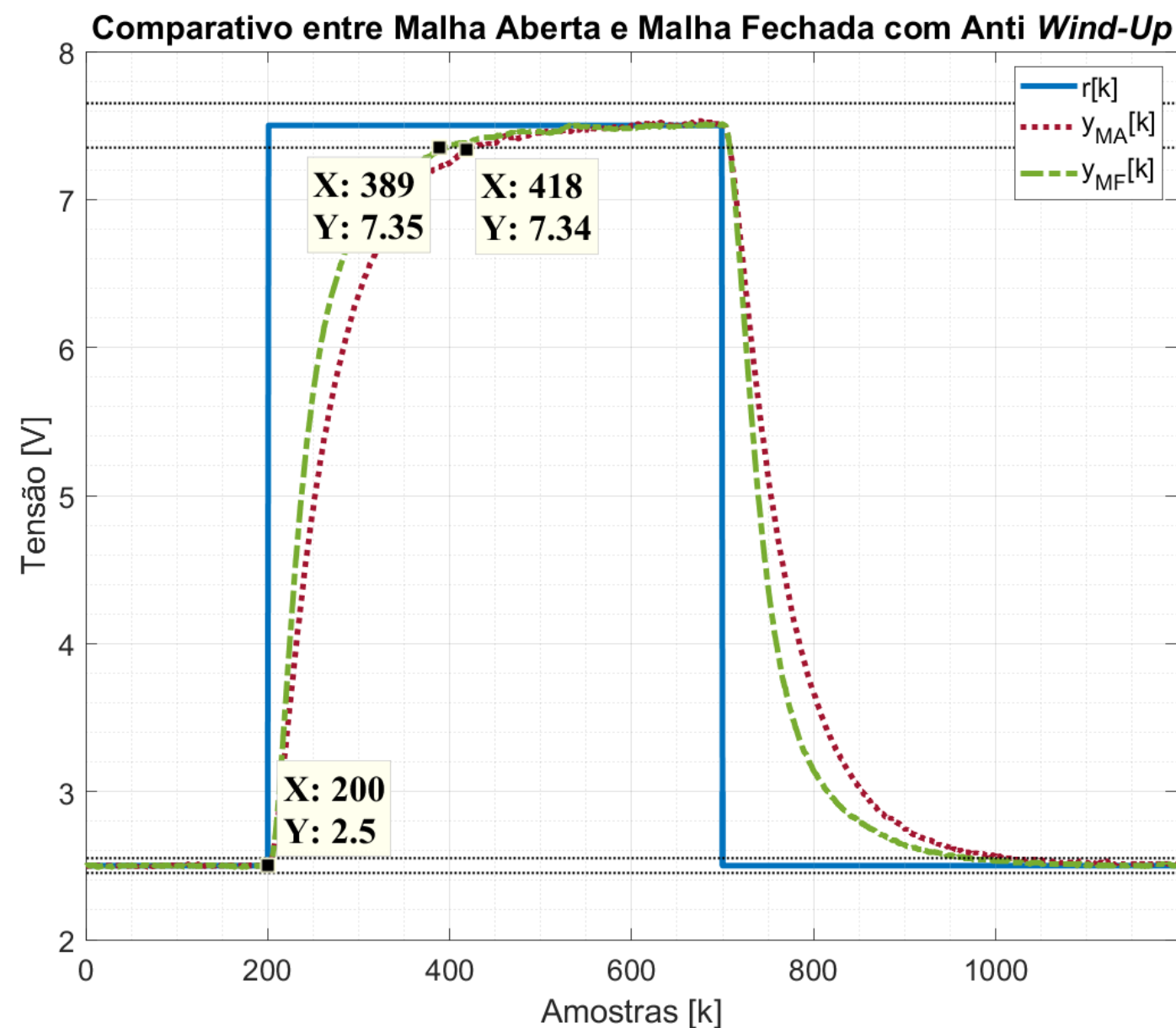


## Aplicação do laço de anti *Wind-up*

- Adaptação do código para utilização desse método

$$K_w = \sqrt{K_d/K_i} \approx 0,056$$





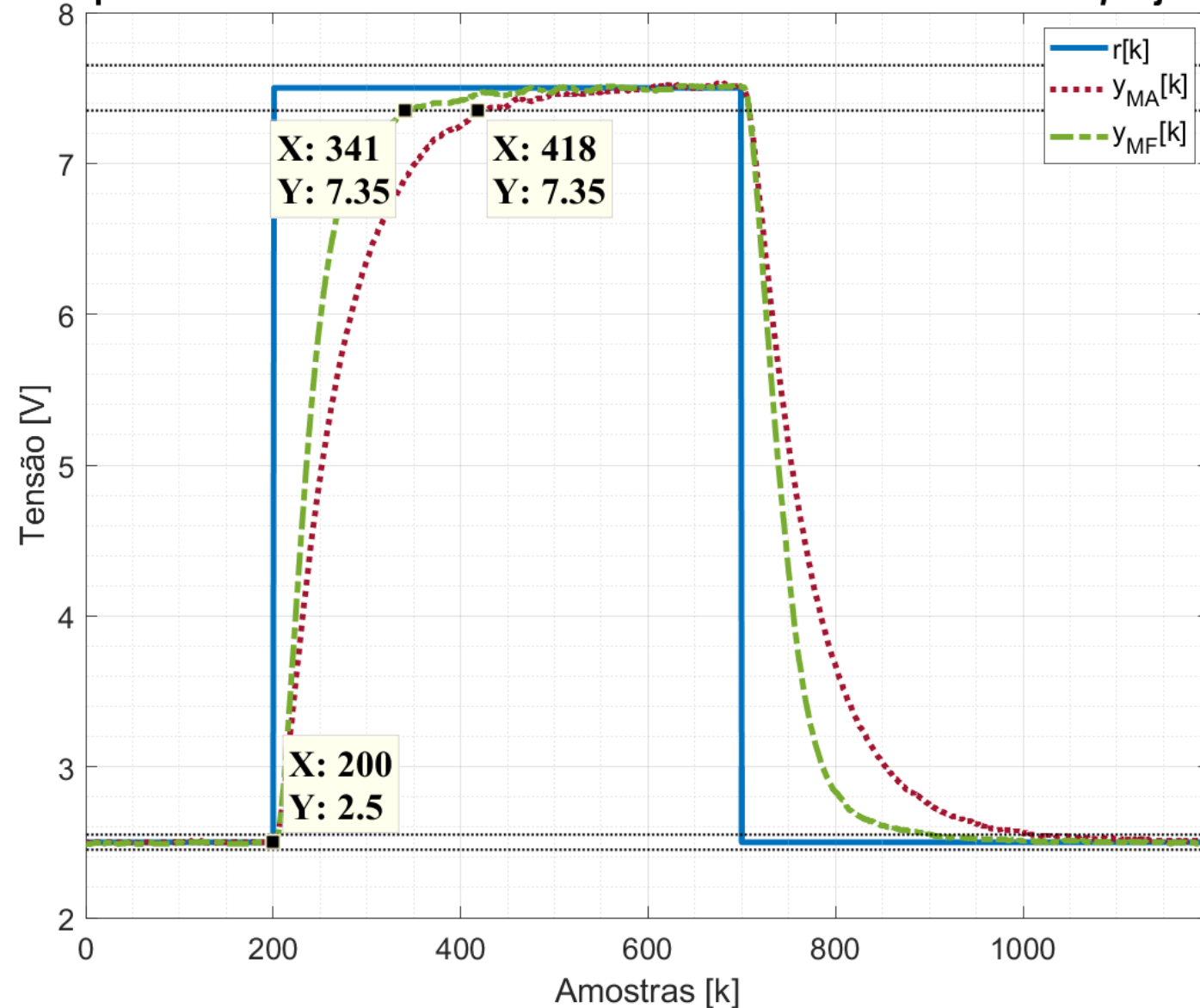
## Resposta a um pulso quadrado

- Tensão inicial de 2,5 Volts
- Salto de 5 Volts aplicado em  $k = 200$
- Salto de -5 Volts aplicado em  $k = 700$

## Considerações:

- Sobrepasso nulo
- Acomodação em 189 amostras
- Tempo de acomodação superior ao projetado (77 amostras acima do projetado)

Comparativo entre Malha Aberta e Malha Fechada com Anti *Wind-Up* Ajustado



## Resposta a um pulso quadrado

- Tensão inicial de 2,5 Volts
- Salto de 5 Volts aplicado em  $k = 200$
- Salto de -5 Volts aplicado em  $k = 700$
- Ganho  $K_w$  reajustado

$$K_w = 0,4 \cdot \sqrt{K_d/K_i} \approx 0,0224$$

## Considerações:

- Sobrepasso nulo
- Acomodação em 141 amostras
- Tempo de acomodação superior ao projetado (29 amostras acima do projetado)



# Análise crítica dos resultados



## DESEMPENHO SOLICITADO

- Erro nulo em regime permanente
- Sobrepasso  $< 10\%$
- Tempo de acomodação em MF menor que em MA (218 amostras)

## RESULTADOS OBTIDOS

- Erro nulo em regime permanente ✓
- Sobrepasso nulo ✓
- Tempo de acomodação de 141 amostras ✓



## Melhorias:

- Alteração no *hardware* para aumentar a excursão do sinal de controle
- Realização de um ensaio que possibilite a melhor captura da dinâmica do sistema



# Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## ENG10019 - Sistemas de Controles Digitais

### Apresentação em tempo real

Autores:  
Eduardo D. Brezolin  
Vitor A. de Carvalho



Ministrante:  
Alexandre S. Bazanella