

# Robótica Móvel

## Controle – Introdução

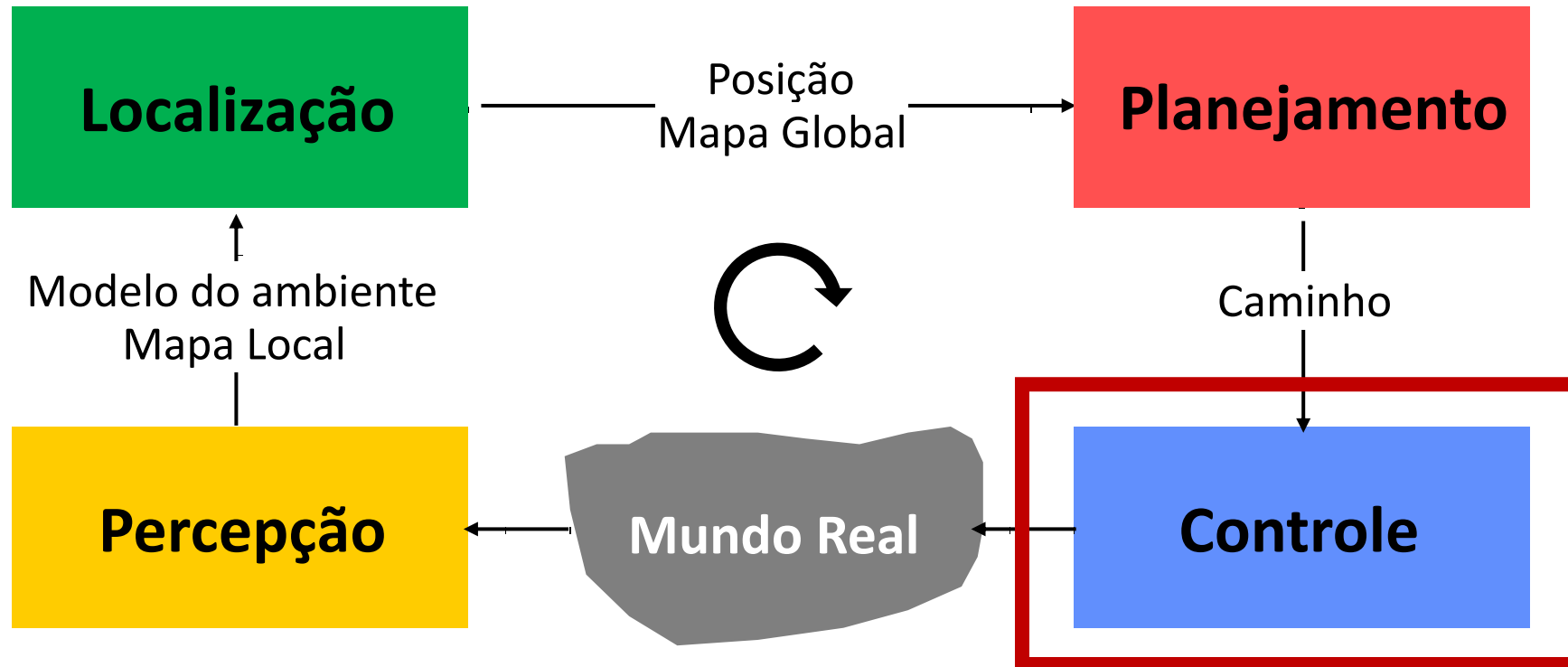
---

Prof. Douglas G. Macharet  
douglas.macharet@dcc.ufmg.br

# Introdução

- Controle de robôs móveis
  - Assunto para um semestre inteiro
- Teoria de controle
  - Assunto para vários semestres
  - Engenharia de Controle e Automação
- Serão abordados os principais tópicos

# Introdução



# Controle

## Conceitos básicos

- Várias coisas podem ser modeladas como sistemas dinâmicos, tendo **estados** e **regras** sobre como esses estados mudam com o tempo

$$\begin{array}{lcl} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) & \longleftarrow & \text{Sistema} \\ \text{vetor de saídas do sistema} \longrightarrow \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) & \longleftarrow & \text{Observação} \\ & \begin{array}{l} \uparrow \text{vetor de estados do sistema} \\ \uparrow \text{vetor de entradas do sistema} \end{array} & \end{array}$$

- Objetivo na teoria de controle é desenvolver modelos e algoritmos que regem as entradas do sistema para levá-lo a um estado desejado

# Controle

## Conceitos básicos

### ■ Baixo nível

- Conceito de **manutenção** → manter um estado
- Qual tensão deve ser aplicada a um determinado motor de forma a se obter e manter uma velocidade angular  $\omega$  na roda?

### ■ Alto nível

- Conceito de **completude** → alcançar um estado
- Qual conjunto de entradas (velocidades) devem ser aplicadas para levar o robô de uma configuração inicial a uma final?

# Controle

## Conceitos básicos

- Noções gerais

$$\text{output} = \text{Controller}(\text{input})$$

- Input: estado desejado / erro (velocidade, configuração)
- Output: sinal de controle (tensão do motor, velocidades)

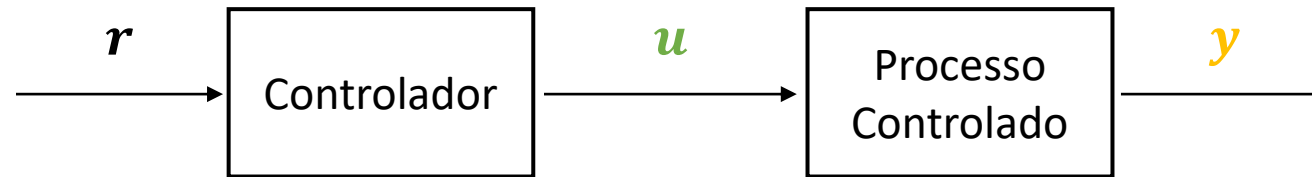
- Formas gerais de controle

- Malha aberta
- Malha fechada

# Controle

## Malha aberta

- Open-loop, Feedforward
- A **entrada de controle** utilizada é independente da **saída do processo**, ou seja, o resultado não é realimentado no sistema

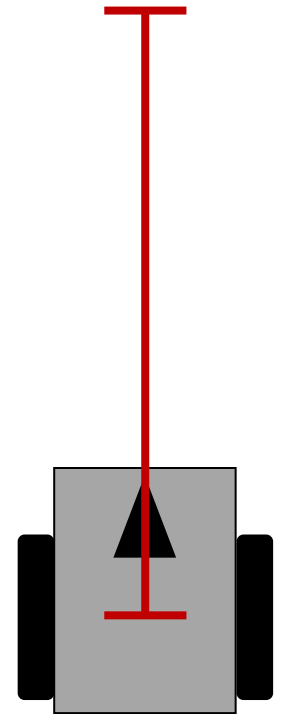


- Não sabemos o efeito da ação, não é possível se adaptar

# Controle

## Malha aberta

- Movimentar o robô um metro para frente
  - Aplicar uma velocidade de 0,25 m/s durante 4s
- Quais as incertezas relacionadas?
  - Atuadores
  - Ambiente
- Quanto mais complexo o estado desejado maior será o impacto no resultado final

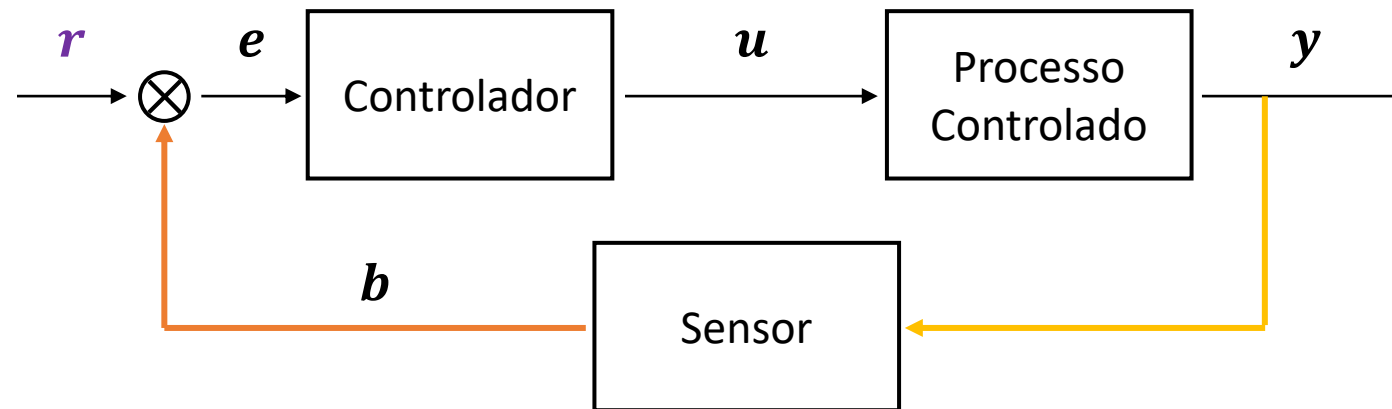




# Controle

## Malha fechada

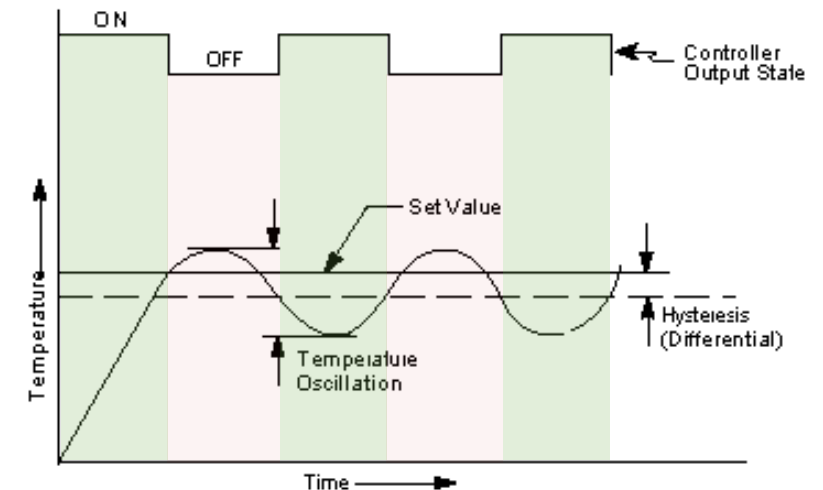
- Closed-loop, Feedback
- O resultado das ações de controle é considerado (realimentado) no sistema, ou seja, podemos verificar se o objetivo foi alcançado



# Controle

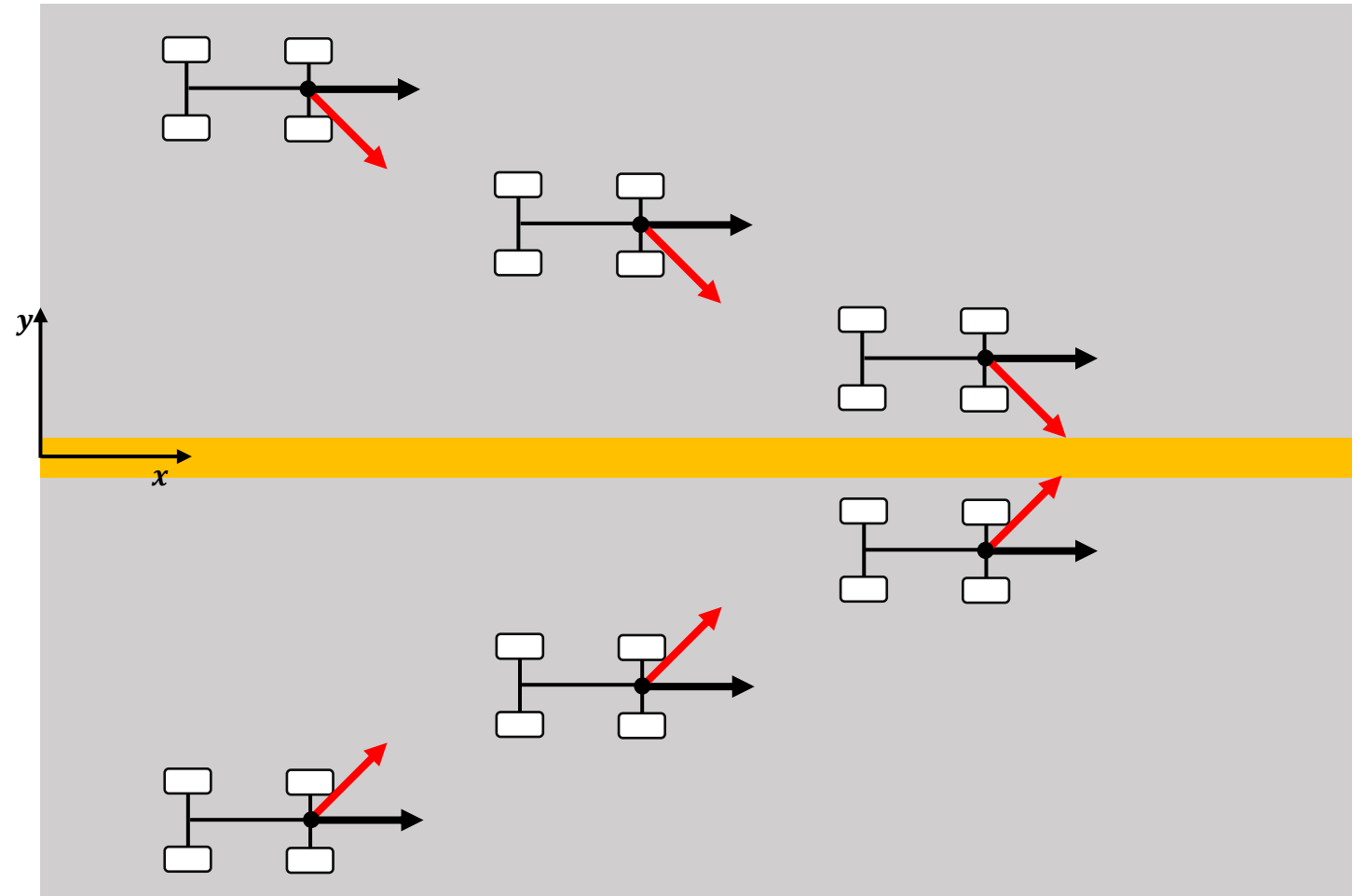
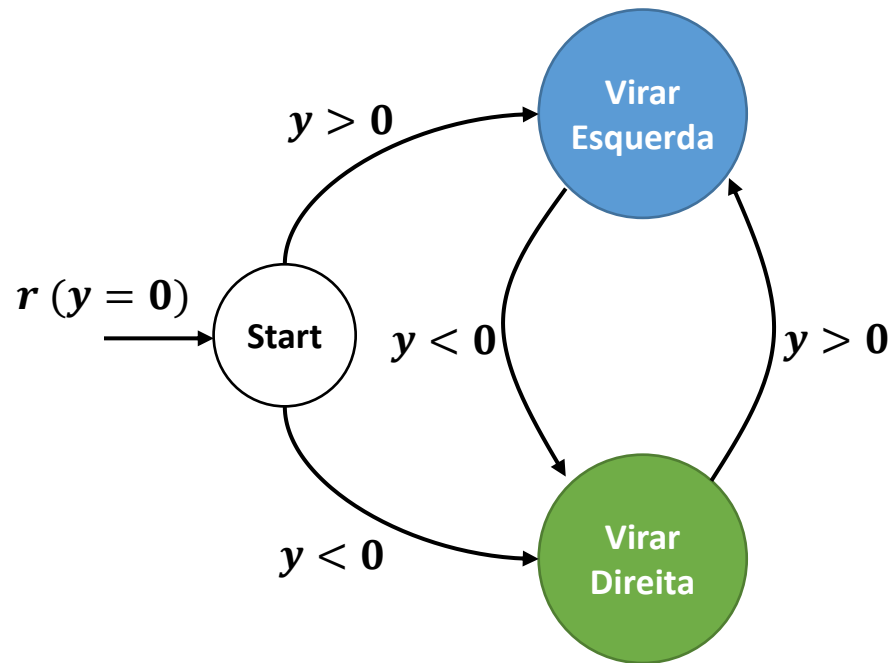
## Malha fechada – Bang-bang (On/Off)

- Controle de malha fechada mais simples
  - Sensor que mede diretamente a variável de estado desejada
  - Atuador que pode *aumentar* ou *diminuir* a variável de estado
- Estratégia
  - Liga/Desliga de acordo com a medição
  - Ação constante “oposta ao problema”
- Problemas
  - Mudanças bruscas/Oscilações



# Controle

## Malha fechada – Bang-bang (On/Off)



# Controle

## Malha fechada – Erro

- Como representar melhor a relação estado/objetivo?
- Erro
  - Diferença entre o valor (estado) atual e o valor desejado
  - Valor atual  $\rightarrow$  Valor medido pelo sensor (incerteza associada)
  - $e = r - b$
- Objetivo do controle é a minimização do erro
  - Tipos de informação: Magnitude, Direção, ...

# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)

- Atuar de forma proporcional ao erro
  - Quanto maior a distância para o estado alvo, mais forte será a resposta do controlador, e quanto mais perto menor ela será

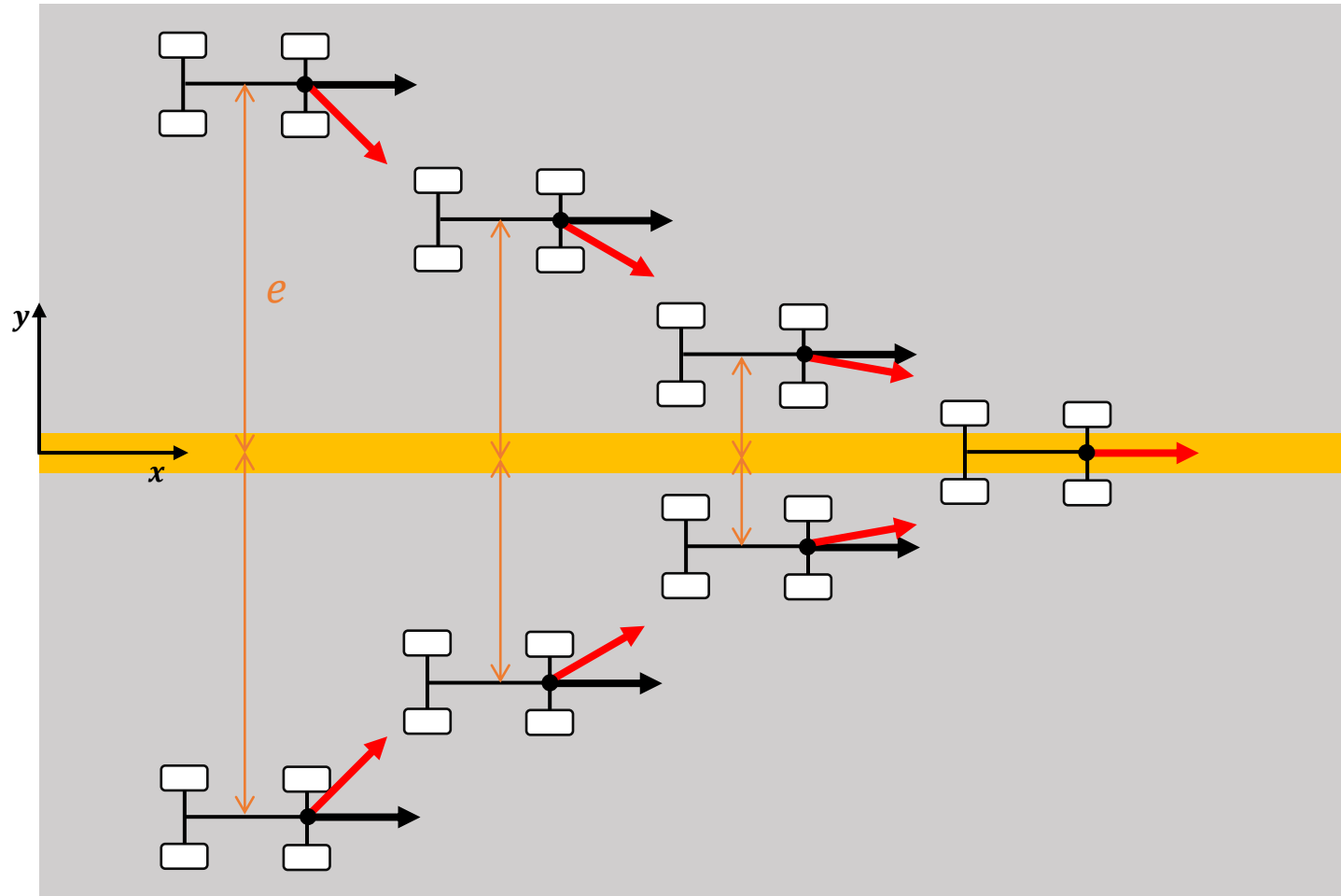
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e$$

- $K_p$  é o ganho proporcional
- O ganho possui grande impacto do desempenho

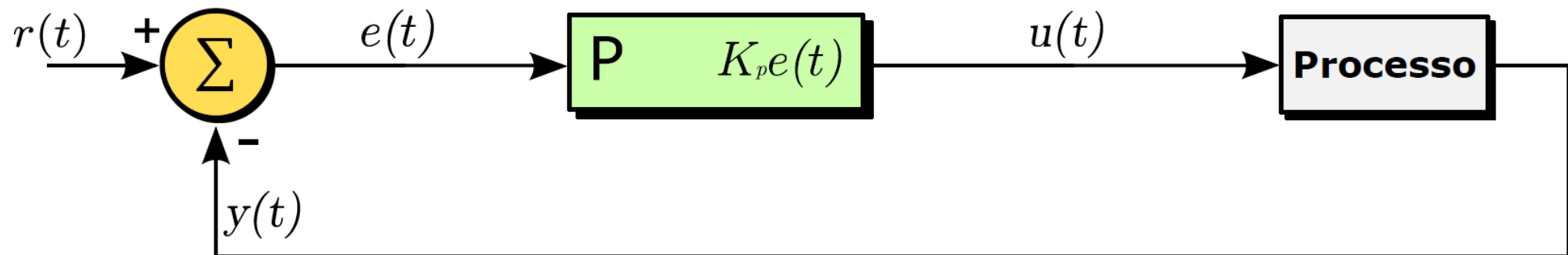
# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)

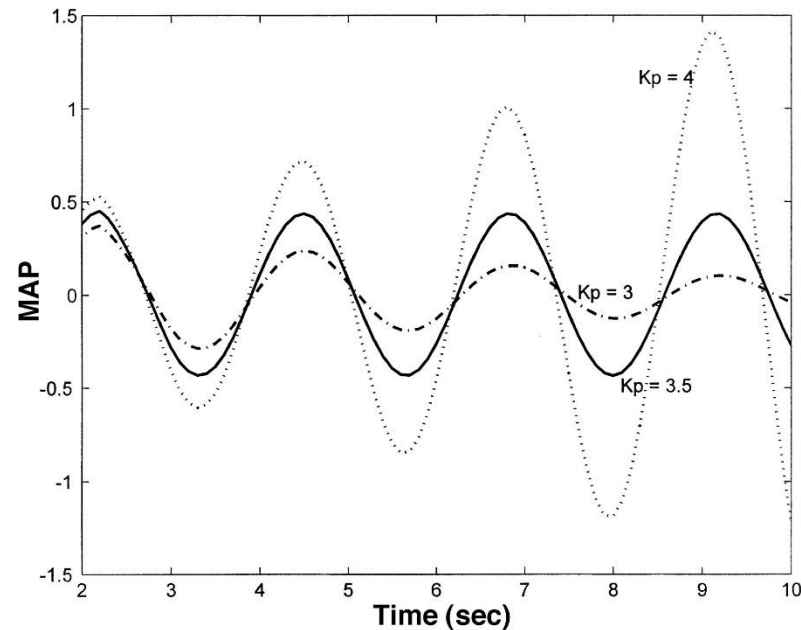
- O ganho possui grande influência no resultado final
- Maneiras de determinar o valor do ganho
  - Analítica: Exige um grande entendimento do sistema e uma boa caracterização matemática do comportamento
  - Empírica: Demanda que o sistema passe por uma extensiva bateria de experimentos e testes de diferentes valores
  - Automática: Ajustado durante a própria execução do sistema



# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)

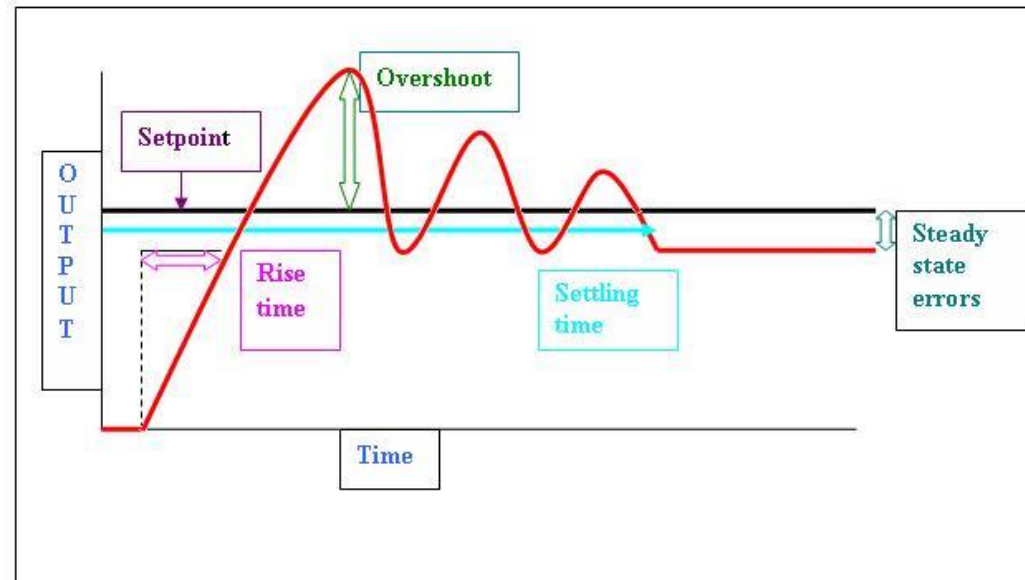
- Principais problemas
  - Ganho alto: Oscilações



# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)

- Principais problemas
  - Ganho baixo: Steady State Error



# Controle

## Malha fechada – Proporcional (P)

- Como resolver esses problemas?
- Oscilações
  - Pode não ser possível controlar totalmente as oscilações apenas ajustando-se o ganho proporcional
  - Adicionar um novo termo, responsável por “dissipar a energia”
- Amortecimento (damping)
  - Evitar que o controlador “vá com muita sede ao pote”
  - Como fazer isso?

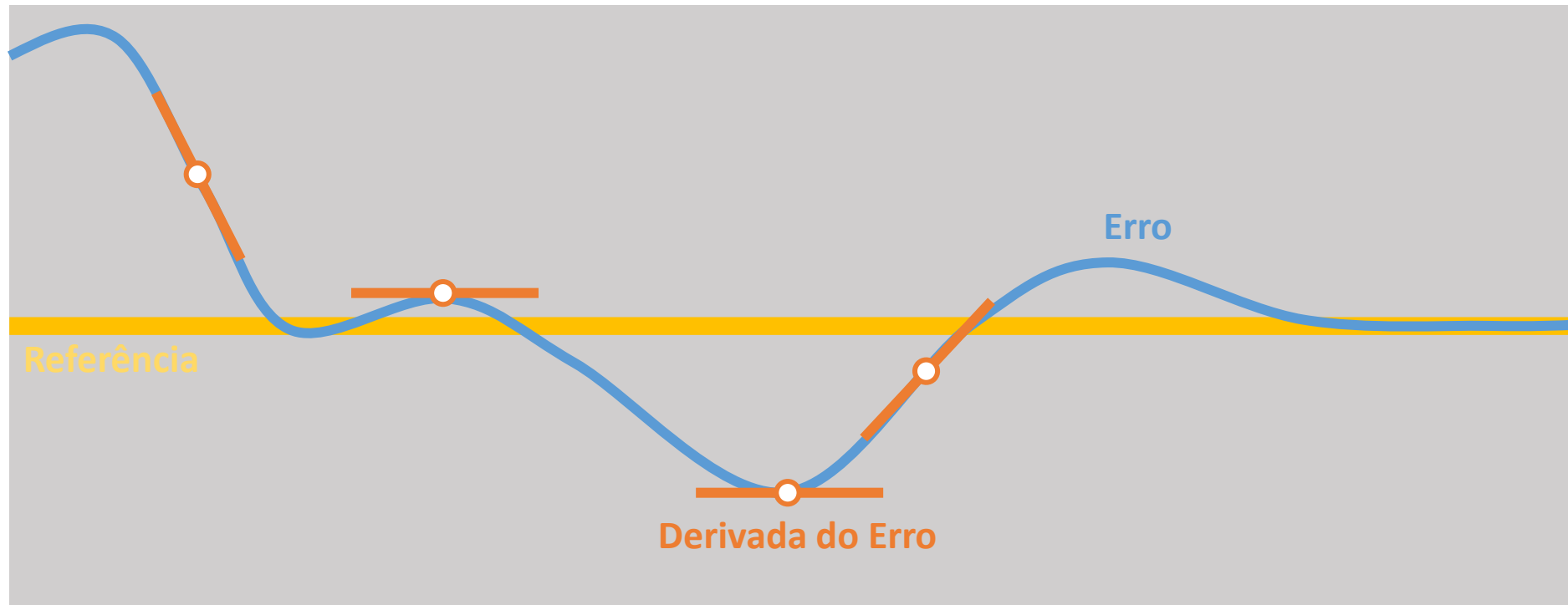
# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)

- Considerar o termo proporcional e adicionar um termo associado à derivada do erro para prover o amortecimento
- A entrada de controle é dada por
$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot de / dt$$
  - $K_d$  é o ganho derivativo
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos
- O termo derivativo também é “proporcional”

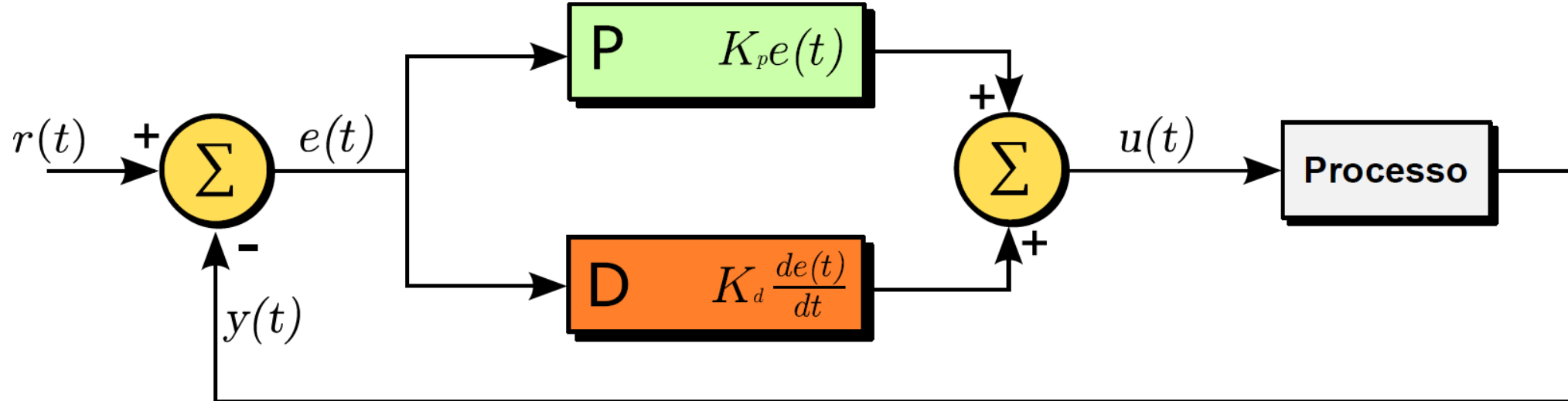
# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Derivativo (PD)

- E o Steady State Error?
  - Sistema não convergiu → erro persistente
- Solução
  - Acumular (somar) o erro ao longo do tempo e então compensá-lo quando se tornar significativamente grande
  - Integral do erro

# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)

- Considerar o termo proporcional e adicionar um termo associado à integral do erro, ou seja, o erro acumulado
- A entrada de controle é dada por

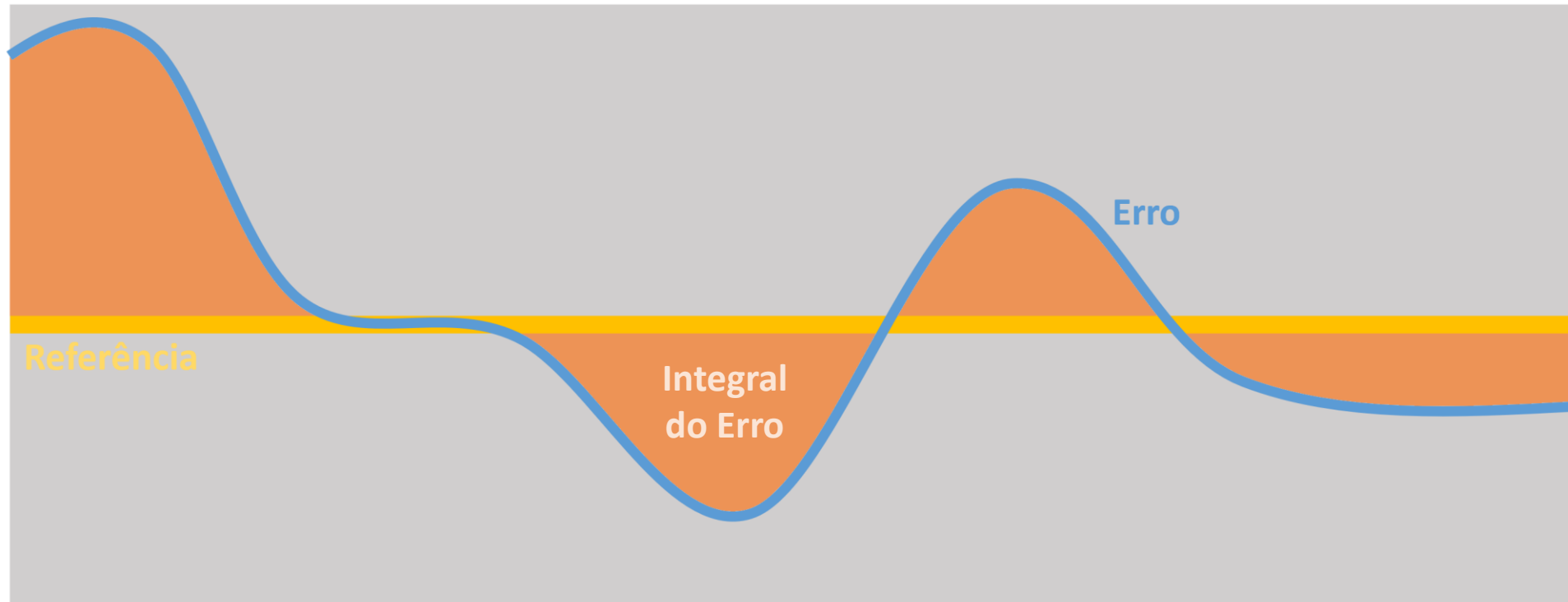
$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt$$

- $K_i$  é o ganho integral
- Os ganhos devem ser escolhidos juntos
- O termo integral também é “proporcional”



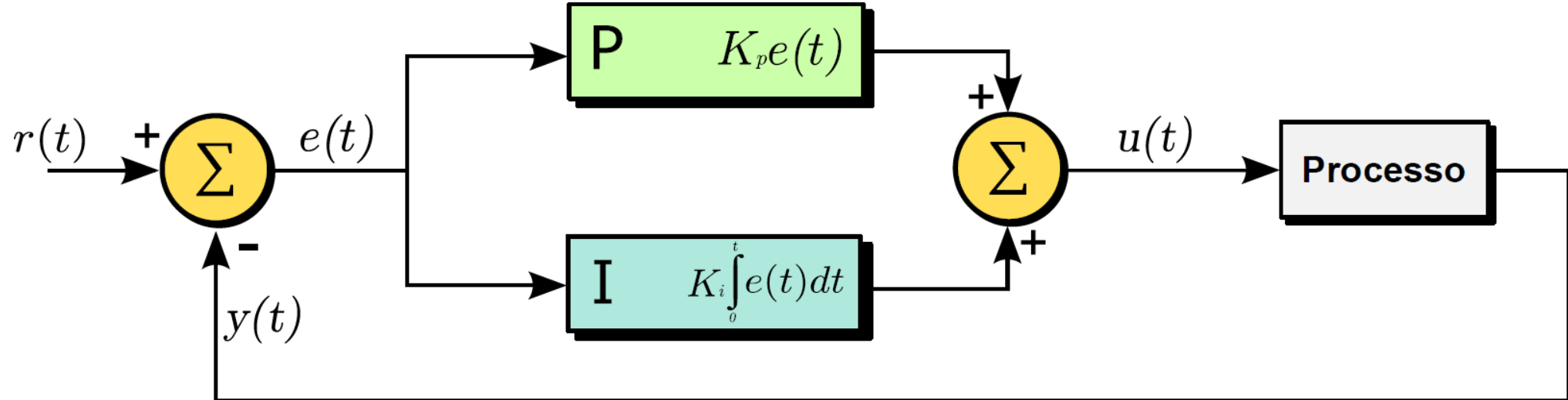
# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral (PI)



# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

- Combinação dos três termos

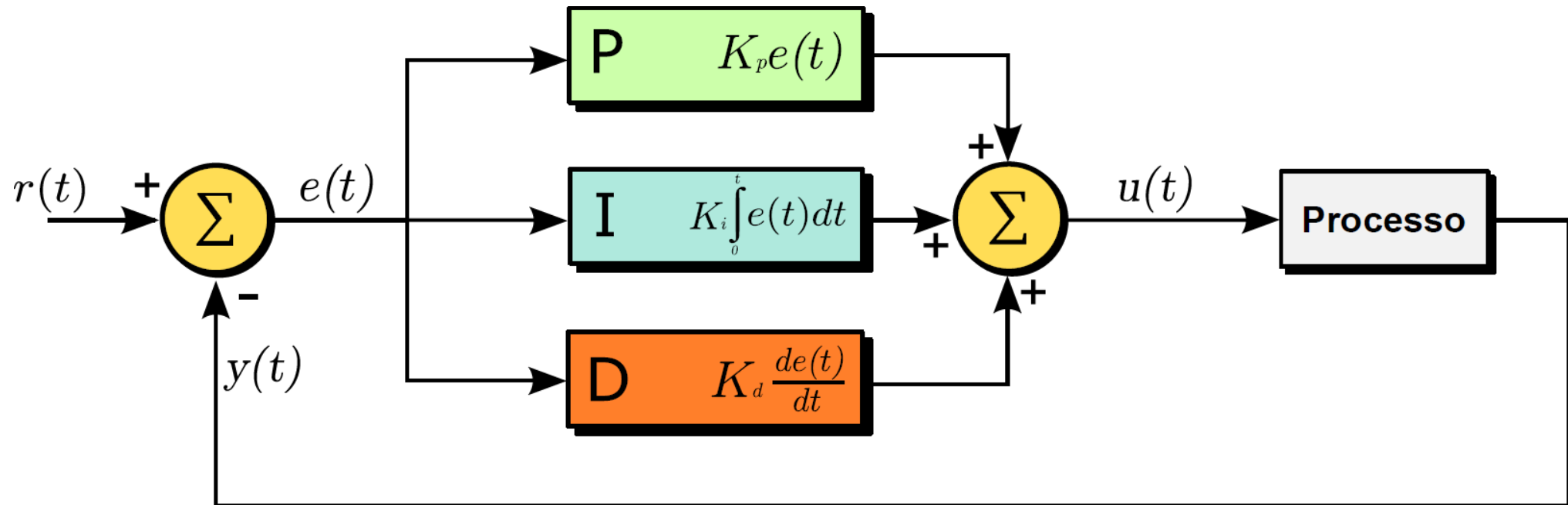
- A entrada de controle é dada por

$$u = K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt + K_d \cdot de/dt$$

- Os ganhos devem ser escolhidos juntos
  - Tarefa bem mais complicada!

# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



# Controle

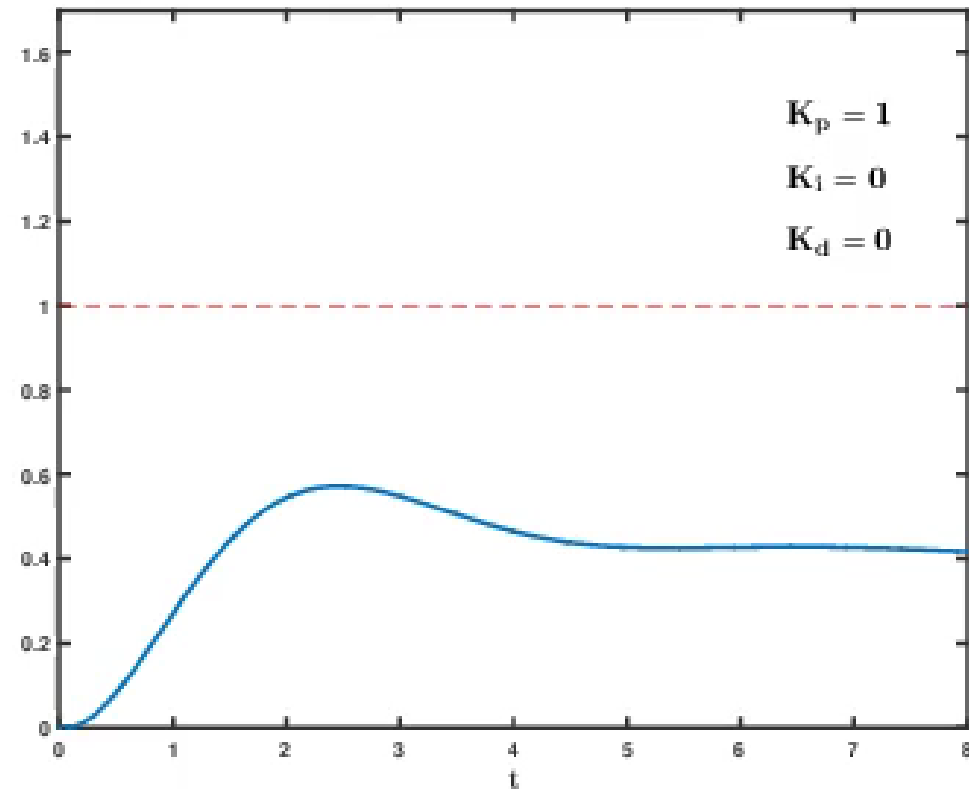
## Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Parâmetro	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State
$K_p$	Diminui	Aumenta	Imperceptível	Diminui
$K_i$	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
$K_d$	Imperceptível	Diminui	Diminui	Nenhuma

- **Rise Time:** Tempo que o sistema leva para ultrapassar 90% da referência a primeira vez.
- **Overshoot:** Quanto o nível de pico é mais alto do que o estado estacionário.
- **Settling Time:** Tempo que leva para o sistema convergir para o estado estacionário.
- **Steady State Error:** Diferença entre a saída de estado estacionário e a saída desejada.

# Controle

## Malha fechada – Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



<https://youtu.be/0IxLrWtiCFY>

# Considerações finais

Controller	Estimates	When to use	Examples
P	Present	Systems with slow response, systems tolerant to offset	Float valves, thermostats, humidistat
I	Back	Not often used alone, as is too slow	Used for very noisy systems
D	Forward	Not used alone because it is too sensitive to noise and does not have set point	None
PI	Present & back	Often used	Thermostats, flow control, pressure control
PID	All time	Often used, most robust, but can be noise sensitive	Cases where the system has inertia that could get out of hand: i.e. temperature and concentration measurements on a reactor to avoid runaway.

# Considerações finais

- Como utilizar esses conceitos para realizar movimentos mais complexos, por exemplo, utilizando esses veículos?
  - Motion control (kinematic control) → considerar o veículo

