



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA-AERONÁUTICA

MPS-43: SISTEMAS DE CONTROLE

# I. INTRODUÇÃO

---

Prof. Davi Antônio dos Santos ([davists@ita.br](mailto:davists@ita.br))

Departamento de Mecatrônica

<http://www.professordavisantos.com> — **courses/MPS-43**

Agosto/2022  
São José dos Campos

# Sumário

## I. INTRODUÇÃO

### I.1. Exemplos

I.1.1. Sistemas não Automáticos

I.1.2. Sistemas Automáticos

### I.2. Sistema de Controle Automático

I.2.1. Definição

I.2.2. Componentes

### I.3. Histórico

# Sumário

## I.4. Projeto de Sistemas de Controle

I.4.1. Partes de um Projeto

I.4.2. Procedimento Geral

I.4.3. Tipos de Lei de Controle

I.4.4. Exemplo: Servomecanismo de Posição Angular

## I.5. Realimentação

I.5.1. Conceitos

I.5.2. Exemplo Ilustrativo

I.5.3. Efeitos da Realimentação

# Exemplos

# I.1. Exemplos

## I.1.1. Sistemas não Automáticos

### 1. Ajuste de temperatura do chuveiro



# I.1. Exemplos

## 2. Controle de movimento do veículo



# I.1. Exemplos

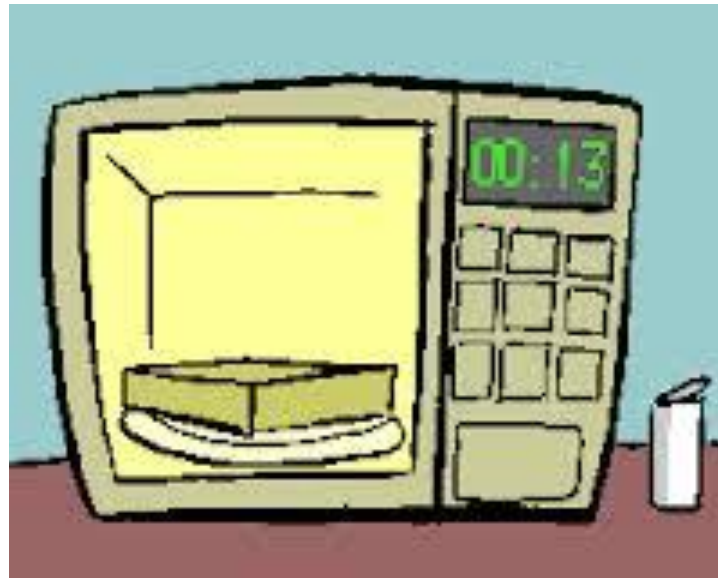
## 3. Controle de voo de aviões da Primeira Guerra Mundial



# I.1. Exemplos

## I.1.2. Sistemas Automáticos

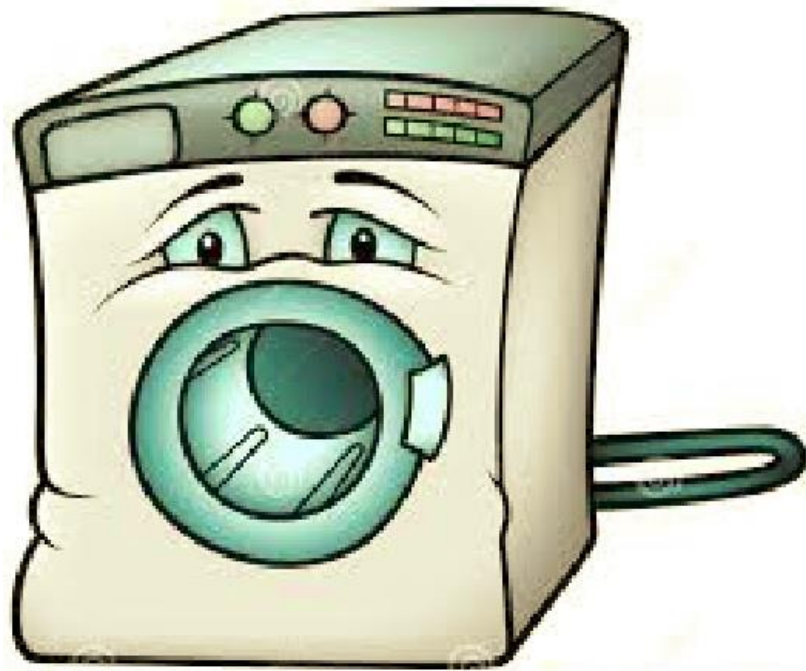
### 1. Forno microondas





# I.1. Exemplos

## 2. Máquina de lavar



# I.1. Exemplos

3. No automóvel (vidro elétrico, airbag, ABS, etc.)



# I.1. Exemplos

## 4. Avião



# I.1. Exemplos

## 5. Satélite



# I.1. Exemplos

## 6. Veículos aéreos não tripulados (robôs aéreos)



# I.1. Exemplos

## 7. Pequenos Veículos Aéreos Elétricos

Lillium



Aurora (Boeing)



Embraer



<https://www.youtube.com/watch?v=8qotuu8JjQM>

# I.1. Exemplos

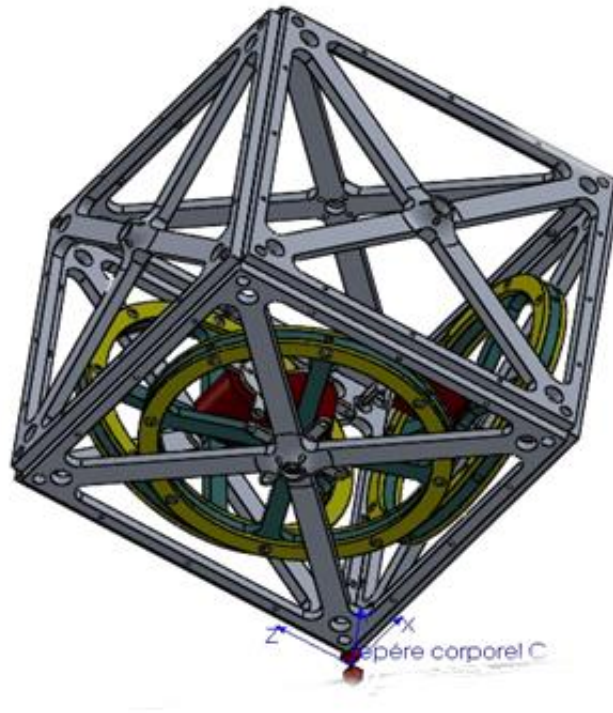
## 8. Lançadores de Satélites



<https://www.youtube.com/watch?v=sX1Y2JMK6g8>

# I.1. Exemplos

## 9. Cubli



<https://www.youtube.com/watch?v=8krzqLFjemE>



# Sistema de Controle Automático

# I.2. Sistema de Controle Automático

## I.2.1. Definição



## I.2. Sistema de Controle Automático

... sistema de controle é:

É um sistema de engenharia projetado para dotar um equipamento ou um processo da funcionalidade de receber e obedecer a comandos de forma autônoma.

## I.2. Sistema de Controle Automático

Exemplos:

Controle de Atitude  
de Satélite



Controle de Voo  
de Quadricóptero



# I.2. Sistema de Controle Automático

## I.2.2. Componentes

### 1. Planta ou Processo

É o **objeto** do qual se deseja controlar uma ou mais variáveis. A esse tipo de variável, dá-se o nome de **variável controlada**.

### 2. Atuador

É o componente que **transfere energia para a planta** de forma a **alterar sua variável controlada**. Essa energia é transferida pela chamada **variável de atuação**.

...

## I.2. Sistema de Controle Automático

### 3. Sensor

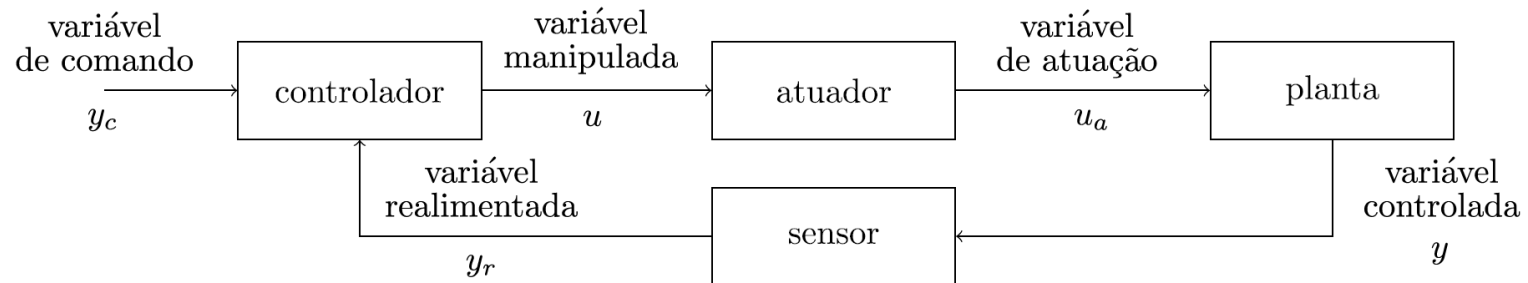
É o componente que **mede a variável controlada**. À medida, dá-se o nome de **variável realimentada**.

### 4. Controlador

É o componente que **produz comandos** (**variável manipulada**) **para o atuador**, de forma que a **variável controlada** assumo o **valor desejado** (**variável de comando**).

# I.2. Sistema de Controle Automático

... em diagrama de blocos:



## I.2. Sistema de Controle Automático

### 3. Satélite (controle de atitude)

**Planta:** estrutura física.

**Atuadores:** rodas de reação e jatos de gás.

**Sensores:** girômetro, star tracker, solar.

**Controlador:** computador embarcado.

**Variáveis controladas:** atitude.

**Variável realimentada:** estimativa (“medida”) de atitude.

**Variáveis manipuladas:** comando de torque em três eixos.

**Variáveis de atuação:** torque em três eixos.

**Variáveis de comando:** comando de atitude.





## I.2. Sistema de Controle Automático

### 4. Quadricóptero (controle de atitude e posição)

**Planta:** estrutura física.

**Atuadores:** ESCs, motores e hélices.

**Sensores:** IMU, magnetômetro, barômetro, GPS, etc.

**Controlador:** computador embarcado.

**Variáveis controladas:** atitude, altitude, posição horizontal.

**Variáveis realimentadas:** estimativas de posição, atitude, velocidades.

**Variáveis manipuladas:** comando de força e torque.

**Variáveis de atuação:** força e torque.

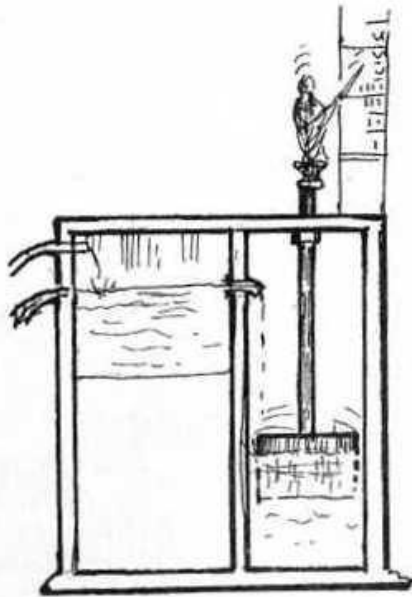
**Variáveis de comando:** comandos de atitude e posição.



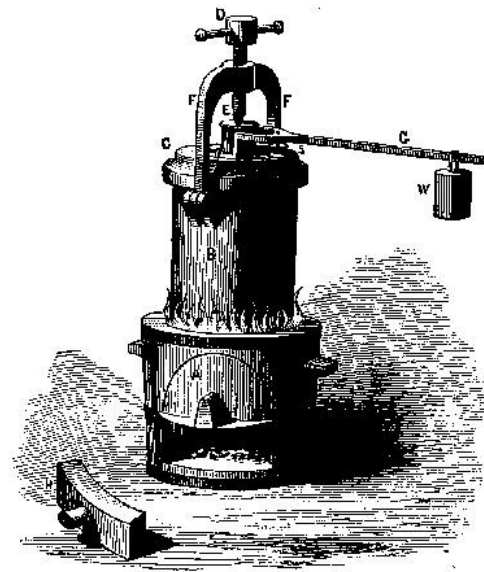
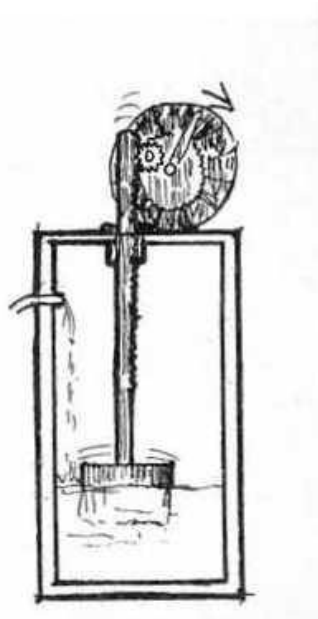
# Histórico

# I.3. Histórico

## Primórdios



Relógio d'água  
de Ktesibios de Alexandria  
III a.C.



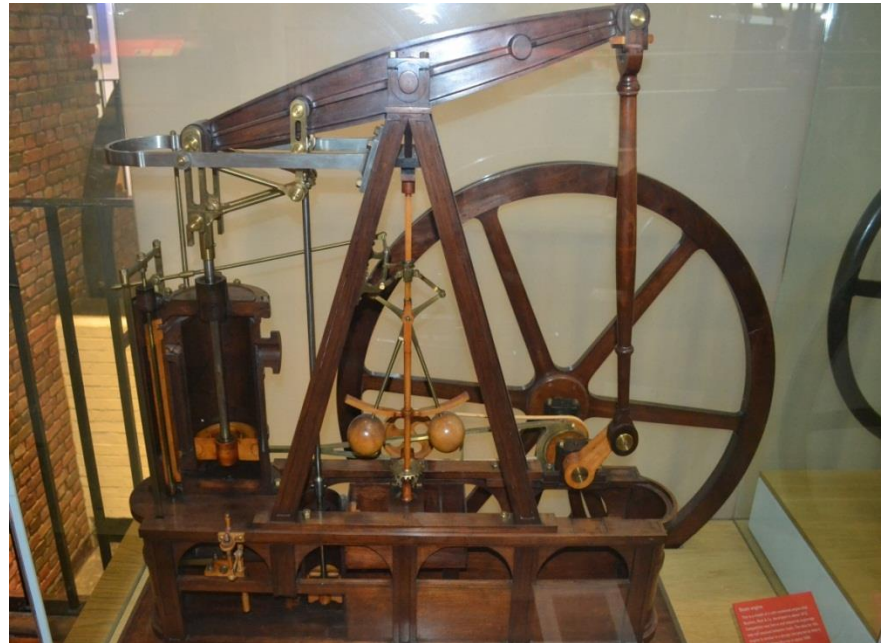
Panela de pressão  
Denis Papin  
(1647-1712)

# I.3. Histórico

## Governador de Watt



James Watt (1736 - 1819)



# I.3. Histórico

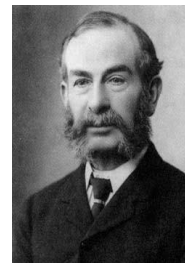
## Equações Diferenciais Ordinárias e Estabilidade



James C. Maxwell (1831 - 1879)

"On governors", 1868

Estabilidade do Governador de Watt

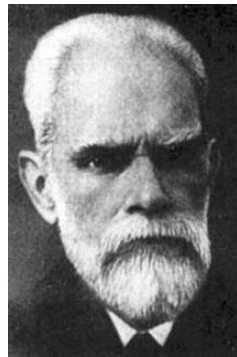


John Routh (1831 - 1907)

Estabilidade de equações de movimento

## I.3. Histórico

### Teoria de Estabilidade de Lyapunov (1892)



Aleksandr M. Lyapunov  
(1857 - 1918)

$$\dot{x}_1 = S + \lambda x_1 - x_1 \{ \mu_1 + k_1 x_4 \}$$

$$\dot{x}_2 = \omega k_1 x_4 x_1 - x_2 \{ \mu_2 + k_2 \}$$

$$\dot{x}_3 = (1 - \omega) k_1 x_4 x_1 + k_2 x_2 - \mu_3 x_3$$

$$\dot{x}_4 = N \mu_3 x_3 - x_4 \{ k_1 x_1 + \mu_v \}$$

$$S = S(x_4) = \frac{s\theta}{\theta + x_4}$$

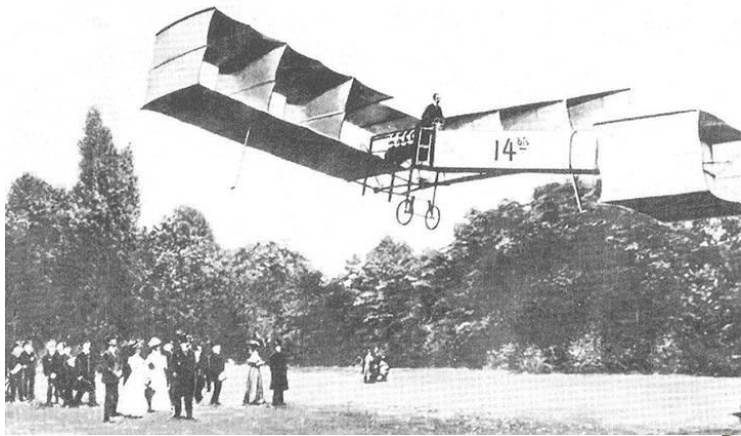
$$\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3) = r \left( 1 - \frac{x_1 + x_2 + x_3}{T_{\max}} \right)$$

$$N = N(t) = \beta_2 - (\beta_2 - N_0) e^{-\beta_1 t}$$

Essa teoria ficou desconhecida da comunidade de controle até a década de 1960!

# I.3. Histórico

## Primeiros aviões (1900-1918)



# I.3. Histórico

## Cr terio de Estabilidade de Routh-Hurwitz

Adolf Hurwitz  
(1859 - 1919)



| ROW   |           |           |           |     |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----|
| 1     | $a_n$     | $a_{n-2}$ | $a_{n-4}$ | ... |
| 2     | $a_{n-1}$ | $a_{n-3}$ | $a_{n-5}$ | ... |
| 3     | $b_1$     | $b_2$     | $b_3$     | ... |
| 4     | $c_1$     | $c_2$     | ...       |     |
| .     | .         |           |           |     |
| .     | .         |           |           |     |
| .     | .         |           |           |     |
| $n+1$ | $d_1$     |           |           |     |



Edward John Routh  
(1831 - 1907)

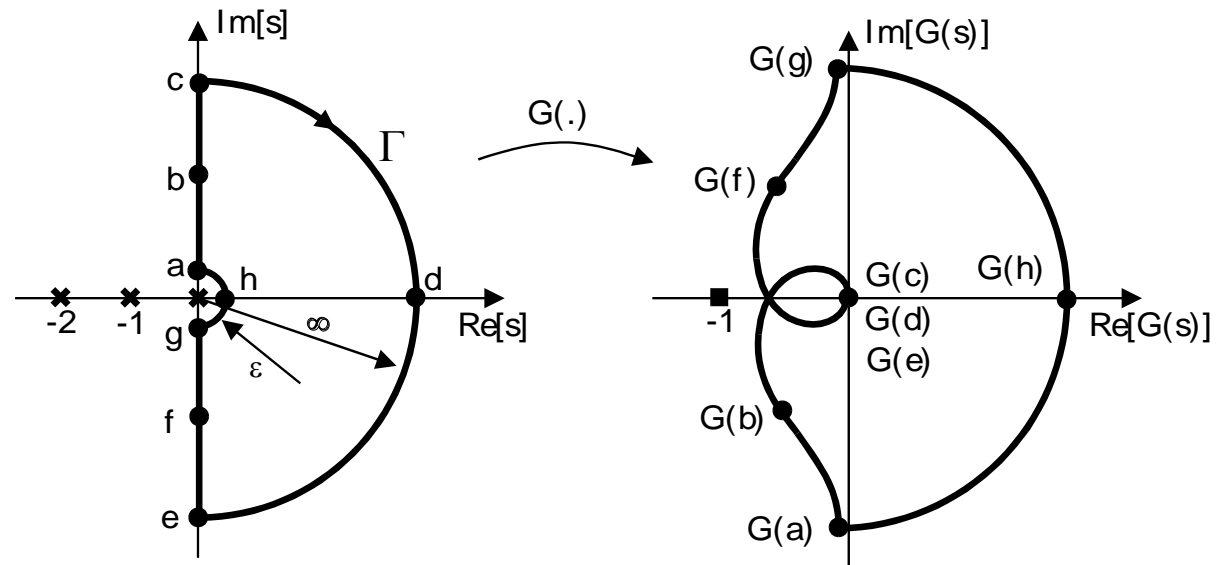


# I.3. Histórico

## Cr terio de Estabilidade de Nyquist (1932, Bell Labs)



Harry Nyquist  
(1889-1976)

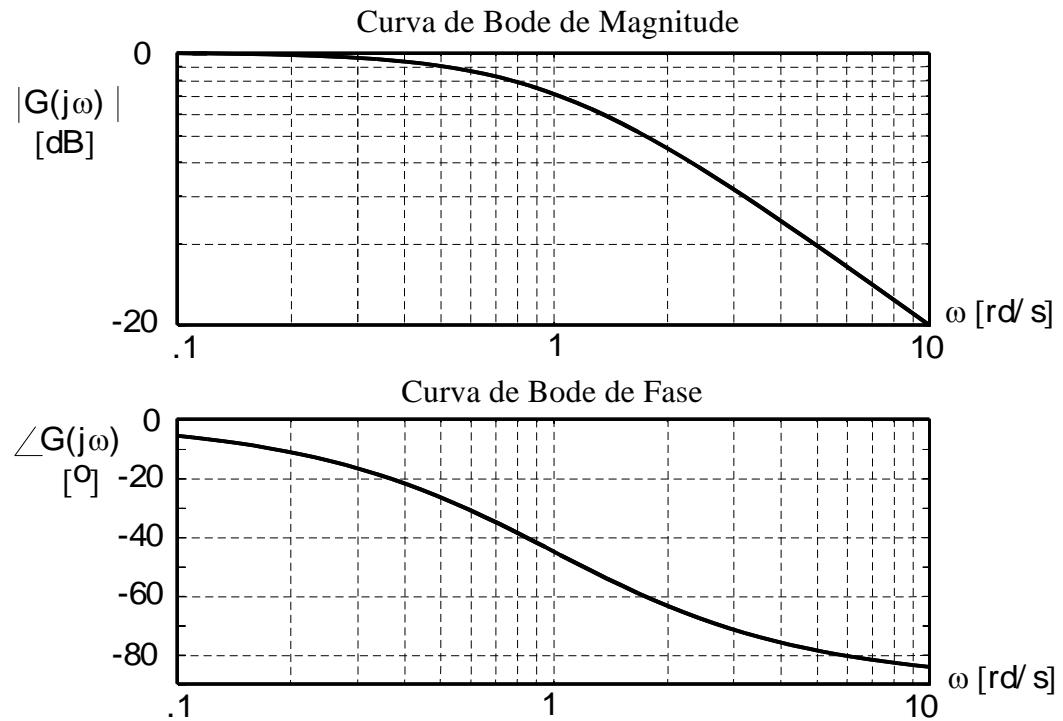


# I.3. Histórico

## Diagrama de Bode (1938, Bell Labs)



Hendrik Wade Bode  
(1905-1982)



# I.3. Histórico

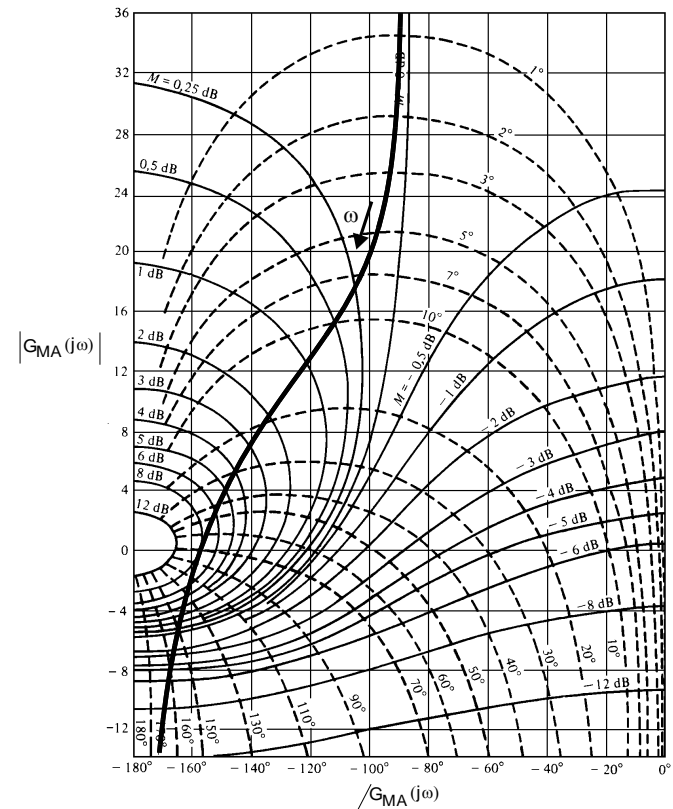
## Diagrama de Nichols-Black (década de 1920)



Nathaniel B. Nichols  
(1914-1997)



Harold Stephen Black  
(1898-1983)

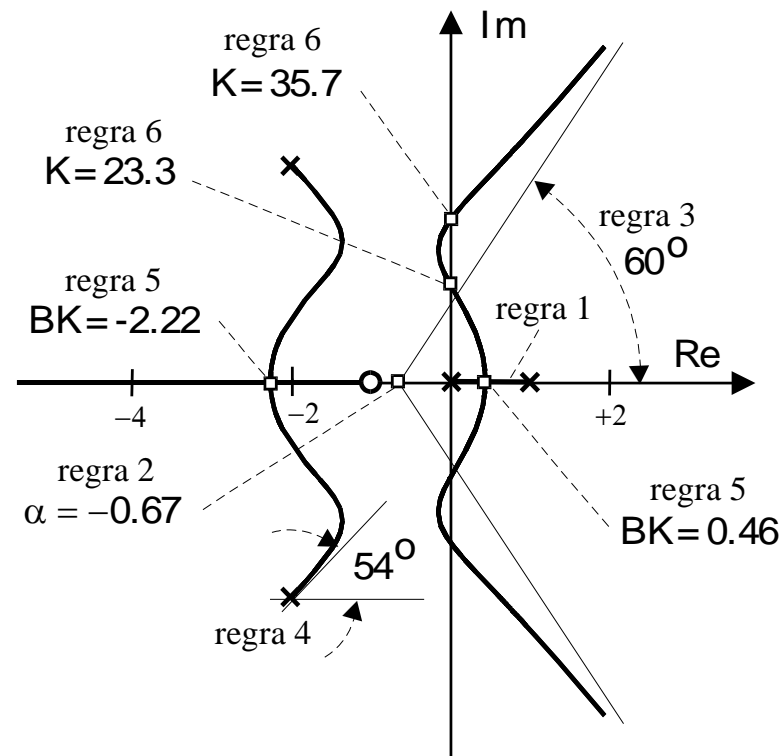


# I.3. Histórico

## Lugar Geométrico das Raízes (1948)

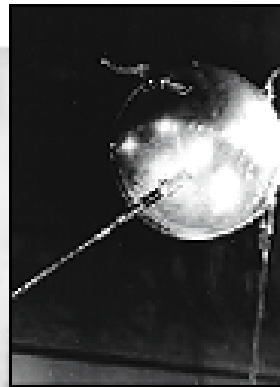
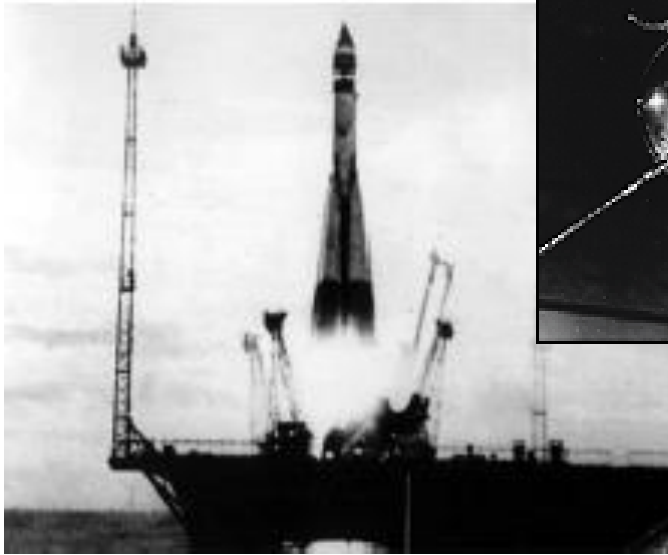


Walter R. Evans  
(1920-1999)



# I.3. Histórico

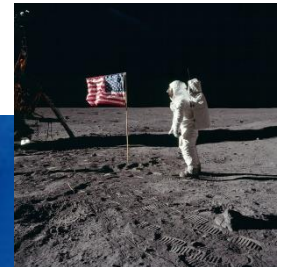
## Corrida Espacial



Sputnik I  
1957



Apollo 11  
1969



# I.3. Histórico

## Métodos de Espaço de Estados



R. E. Kalman  
(1930-2016)



Lev Semenovich Pontryagin  
(1908 - 1988)



Richard E. Bellman  
(1920-1984)

# I.3. Histórico

## Primeiros Computadores Digitais Eletrônicos



ENIAC, 1946



UNIVAC, 1951



IBM PC, 1981

# I.3. Histórico

## Tempos Atuais: Aplicações

Em sistemas  
Mecatrônicos:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Embora fora do escopo do curso, controle também tem aplicações em sistemas:

econômicos, sociais, biológicos, ambientais, etc.



## I.3. Histórico

### Tempos Atuais: Teoria

- Controle preditivo
- Controle ótimo
- Controle adaptativo por modelo de referência
- Controle robusto usando LMIs
- Controle robusto por modos deslizantes
- Controle robusto no sentido probabilístico
- Método backstepping
- Controle por busca extremal
- Controle tolerante a falhas

# Projeto de Sistemas de Controle

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.1. Partes de um Projeto

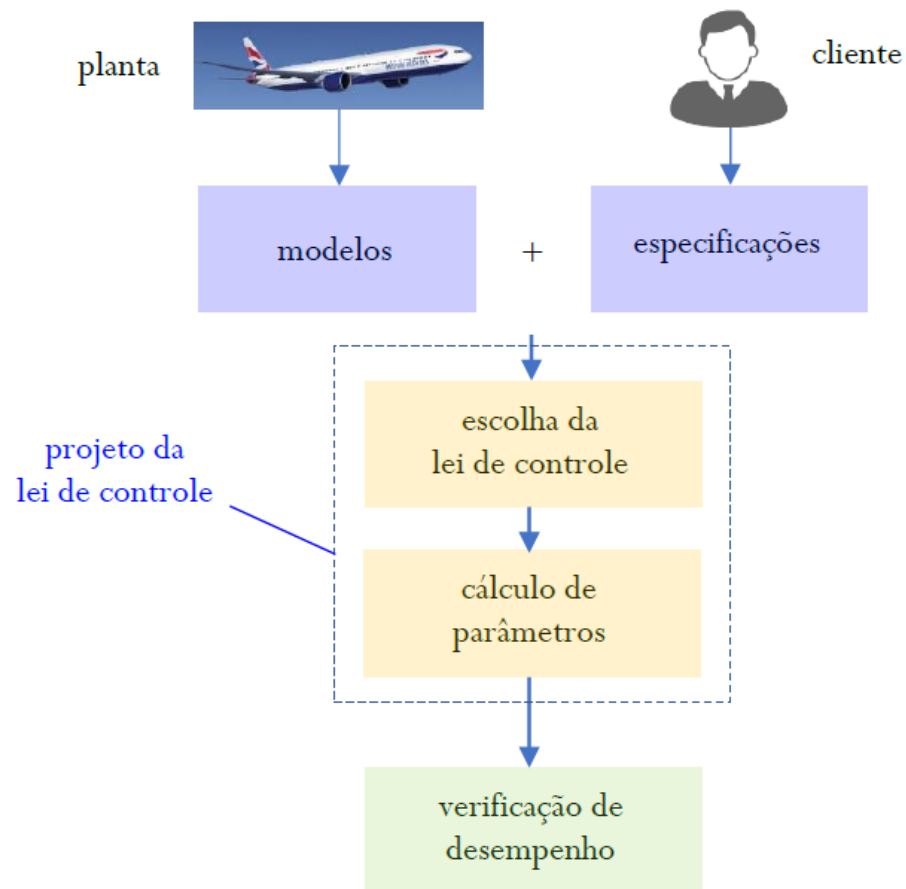
- **Hardware:** escolha e dimensionamento dos sensores, atuadores, computador embarcado e interfaces.
- **Modelagem e identificação:** formulação de modelos dinâmicos e estimação de seus parâmetros a partir de testes experimentais.
- **Software:** implementação de uma estrutura de software para o computador embarcado poder operar em tempo real.

MPS-43

- **Lei de controle:** escolha e dimensionamento da lei de controle para atender a requisitos estáticos e dinâmicos.
- **Avaliação:** simulação e experimentos para comparar o desempenho do sistema projetado com os requisitos estáticos e dinâmicos.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

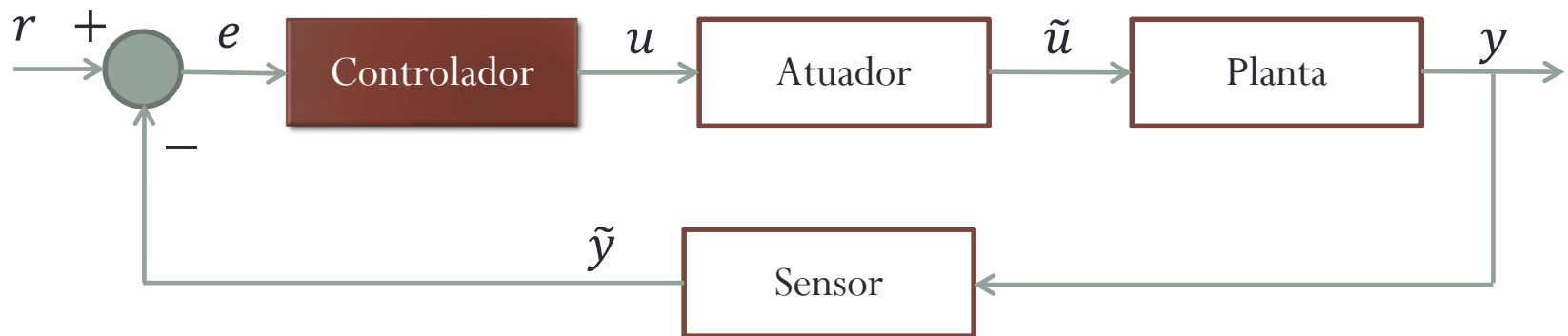
## I.4.2. Procedimento Geral



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle

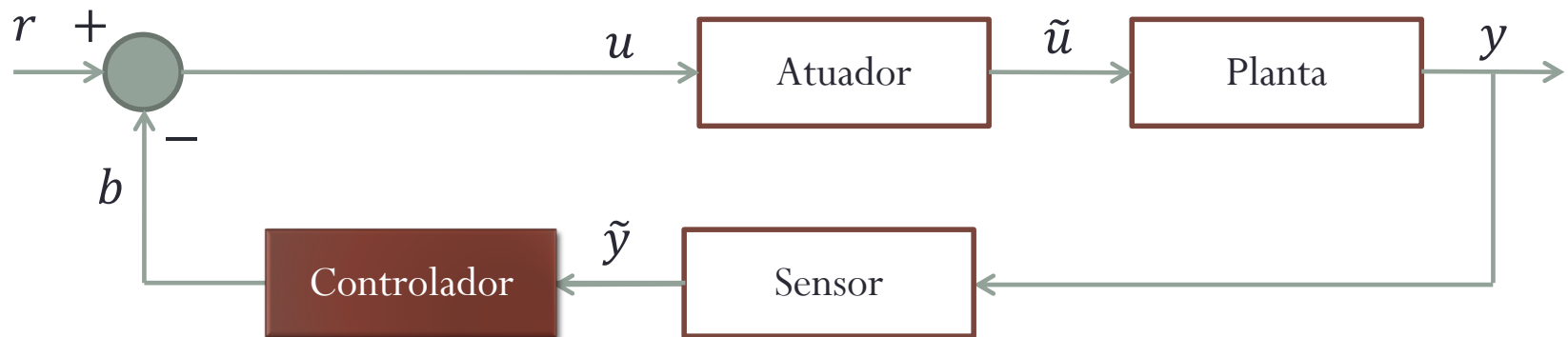
Em cascata



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

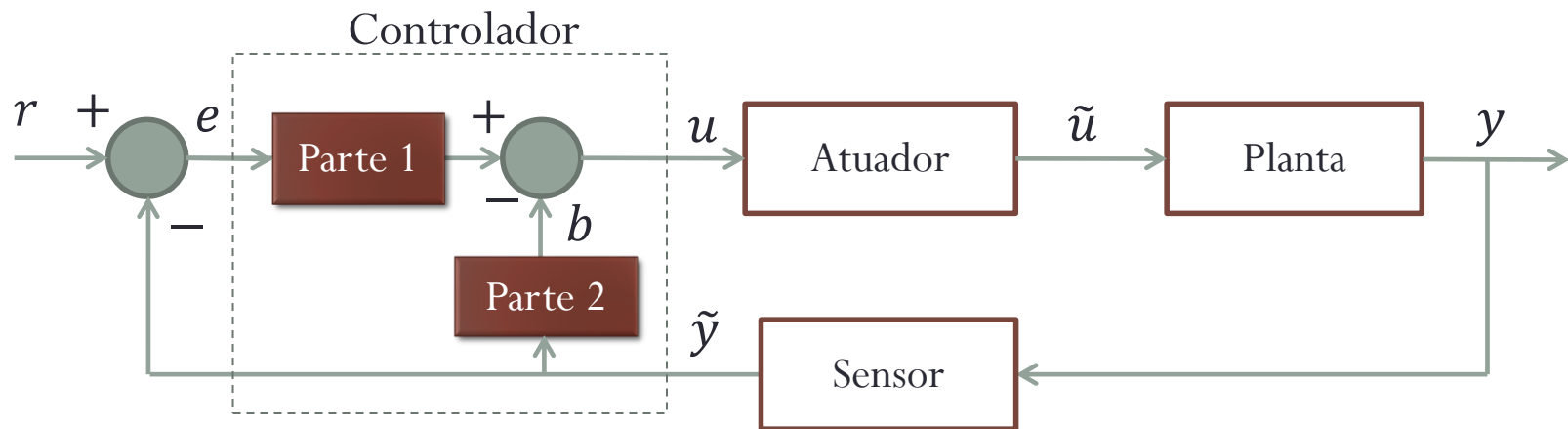
Na realimentação



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipo de Leis de Controle (cont.)

“Misto”

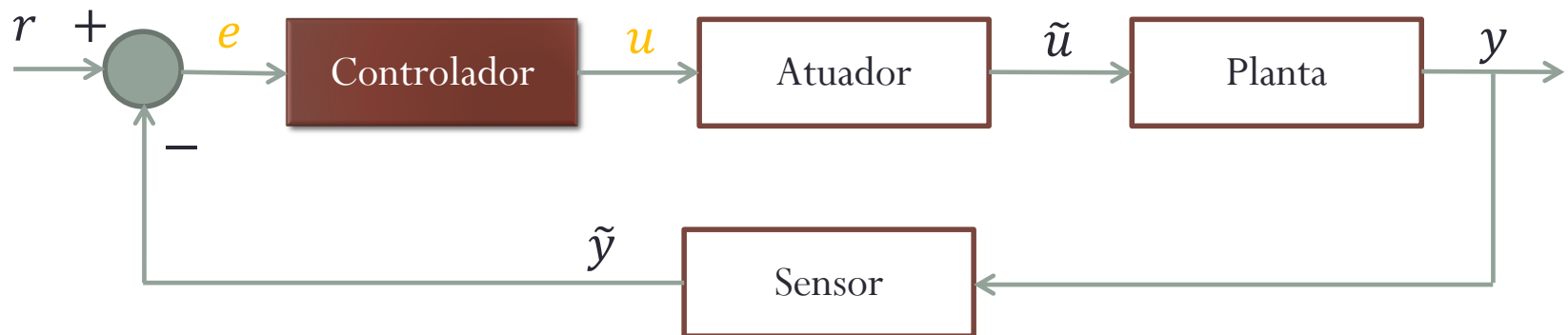


# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Linear x Não Linear

Seja a seguinte malha de controle com controlador em cascata:



**Controlador Linear:** A relação entre  $e$  e  $u$  é *linear*.

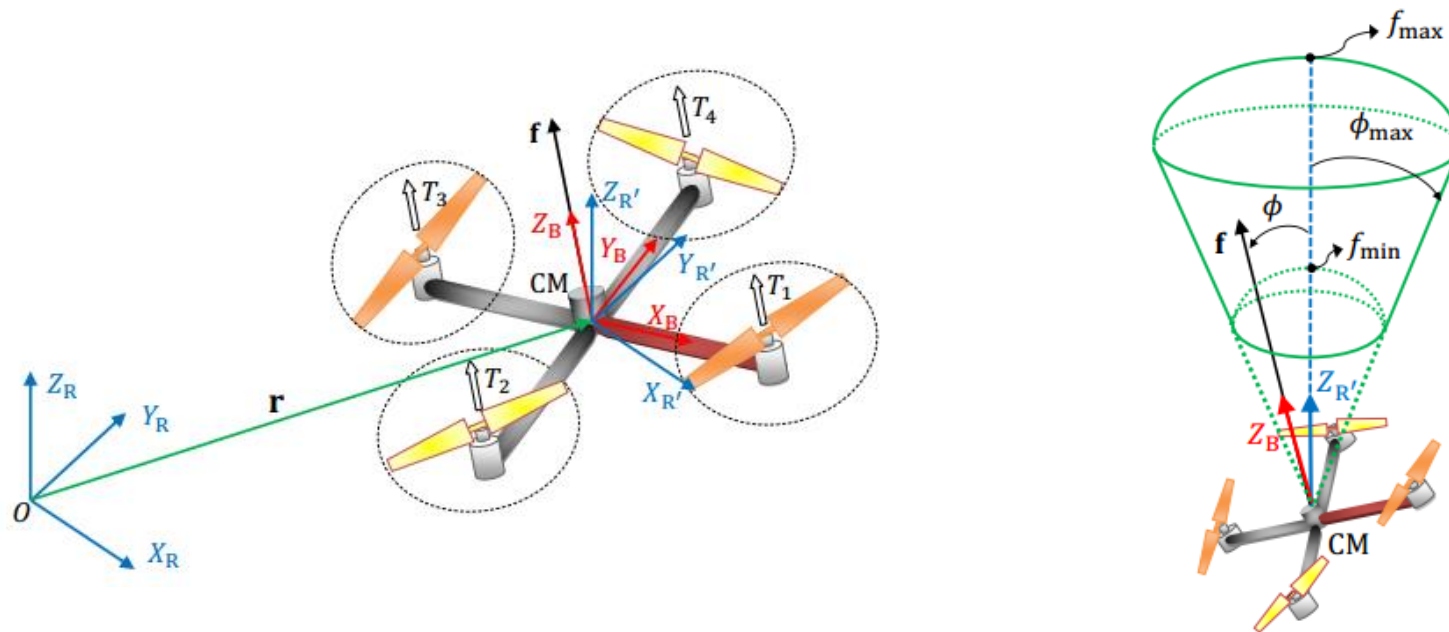
**Controlador Não Linear:** A relação entre  $e$  e  $u$  é *não linear*.



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

**Exemplo:** Controle não-linear de posição de quadricóptero.

Para evitar acelerações excessivas, é conveniente **saturar** o vetor força  $\mathbf{f}$  de forma que esse se mantenha numa região cônica, como a ilustrada na figura abaixo.

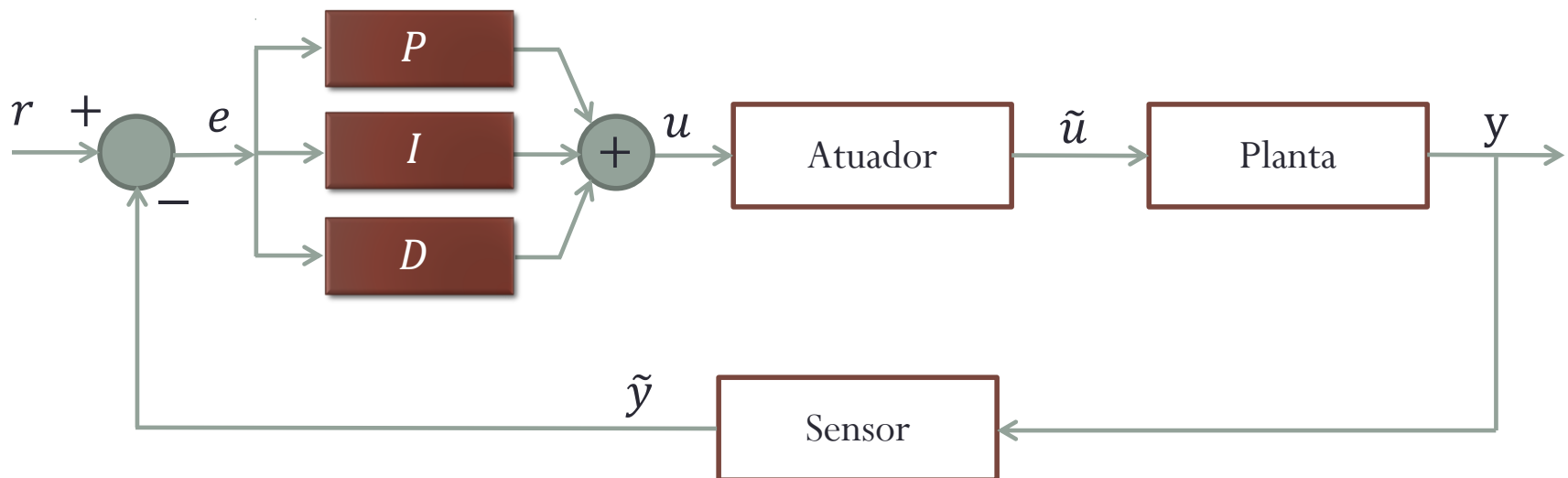


# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

$$u = \underbrace{K_p e}_P + \underbrace{K_i \int_0^t e d\tau}_I + \underbrace{K_d \frac{de}{dt}}_D$$



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Proporcional-Derivativo (PD)

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt}$$

O controlador PD é usado para tornar o sistema **mais rápido**.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Proporcional-Integral (PI)

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e d\tau$$

O controlador PI é usado para melhorar a acuidade do sistema em regime permanente.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Proporcional

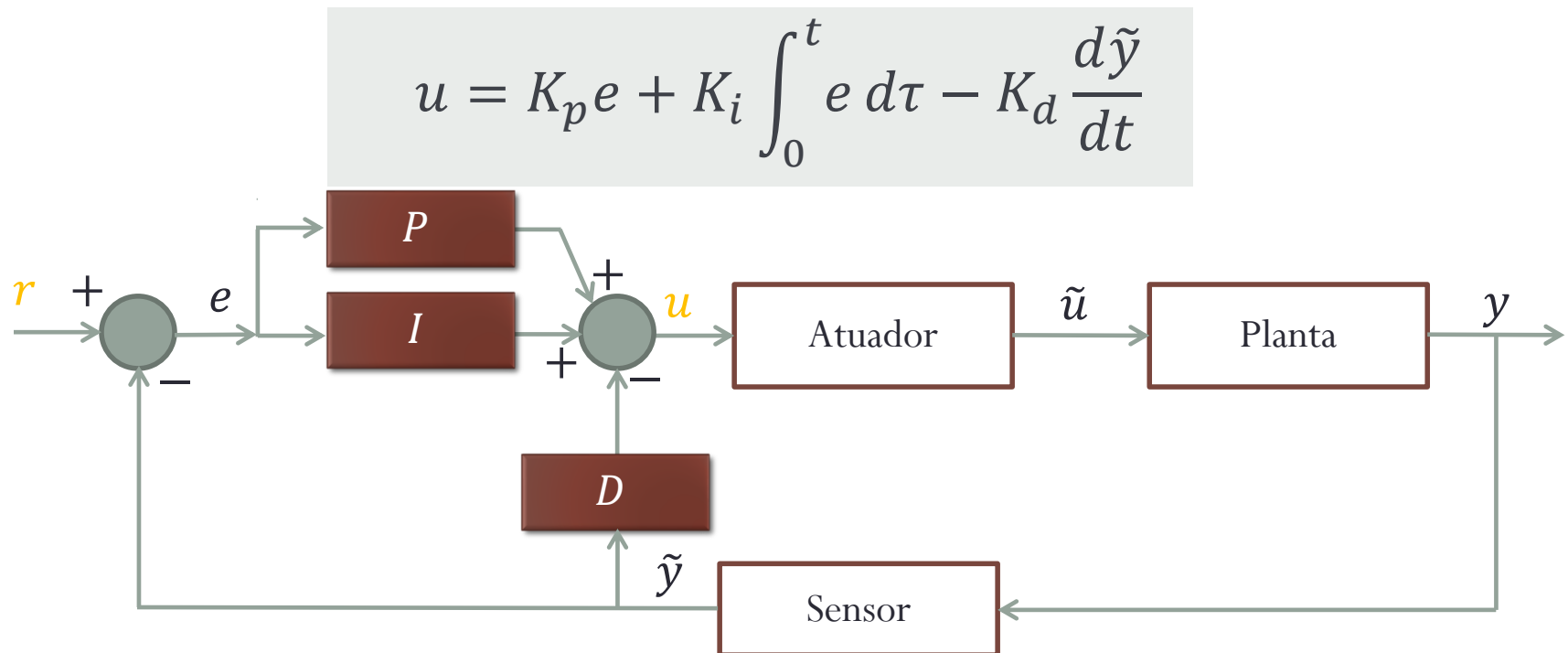
$$u = K_p e$$

É a lei de controle **mais simples** possível.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### PI-D



Colocando-se o **D** na realimentação, **previne-se fortes transitórios** em  $u$  quando  $r$  é submetido a entradas abruptas.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### P-D

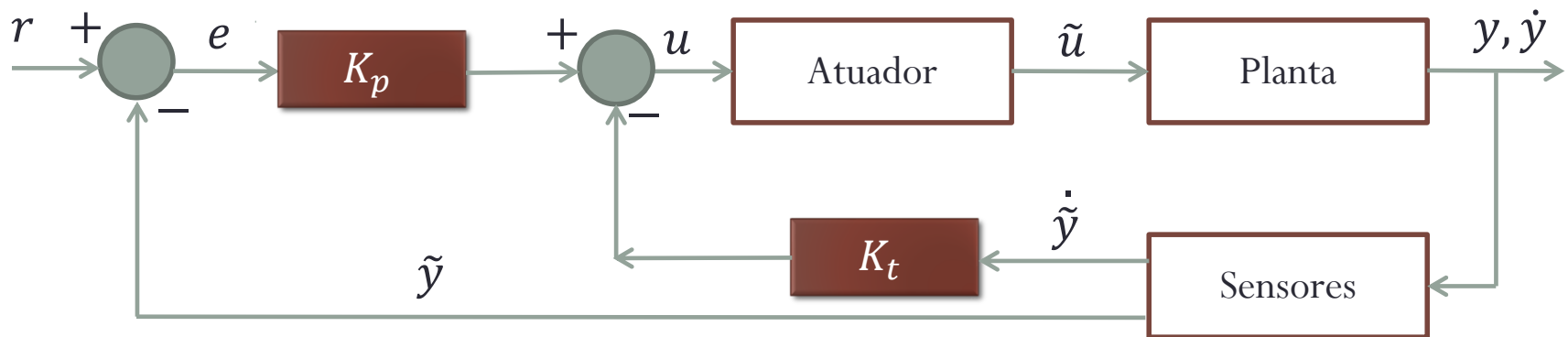
$$u = K_p e - K_d \frac{d\tilde{y}}{dt}$$

O controlador P-D é usado para **amortecer** a resposta transitória do sistema.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Realimentação tacométrica



A **realimentação tacométrica** é usada em substituição à componente **D** do controlador P-D, sempre que medidas tacométricas estão disponíveis. Evita-se assim a derivação de medidas ruidosas.



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

### Avanço/Atraso de Fase (Lead/Lag)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \frac{s + b}{s + a}$$

onde  $s$  é a variável da transformada de Laplace.

- $a > b$ : Lead
- $a < b$ : Lag

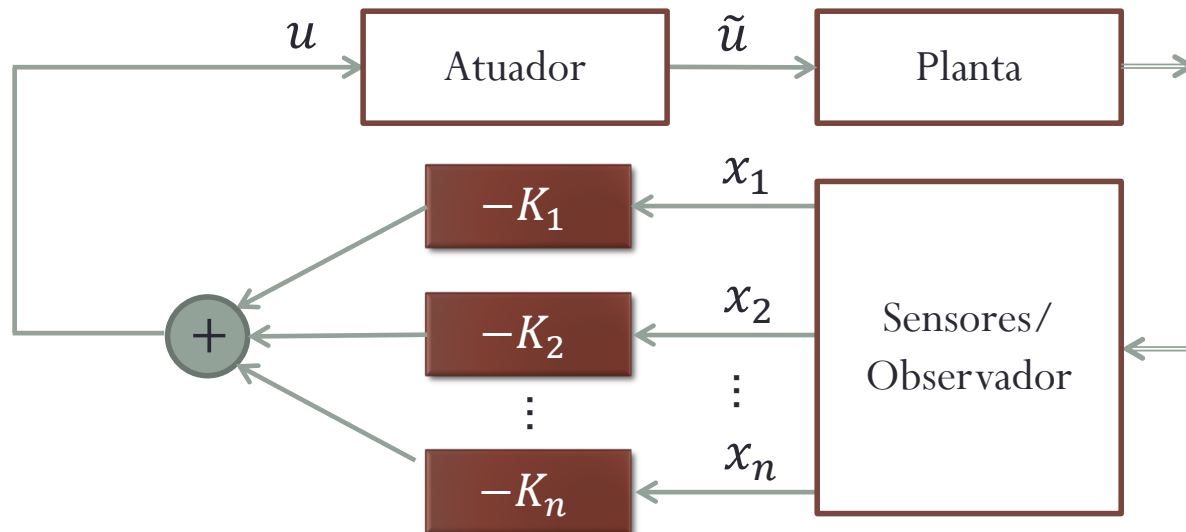
O controlador **Lead** é usado para melhorar a **estabilidade relativa** do sistema, enquanto o **Lag** é usado para melhorar a **acuidade em regime permanente**.

# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.3. Tipos de Lei de Controle (cont.)

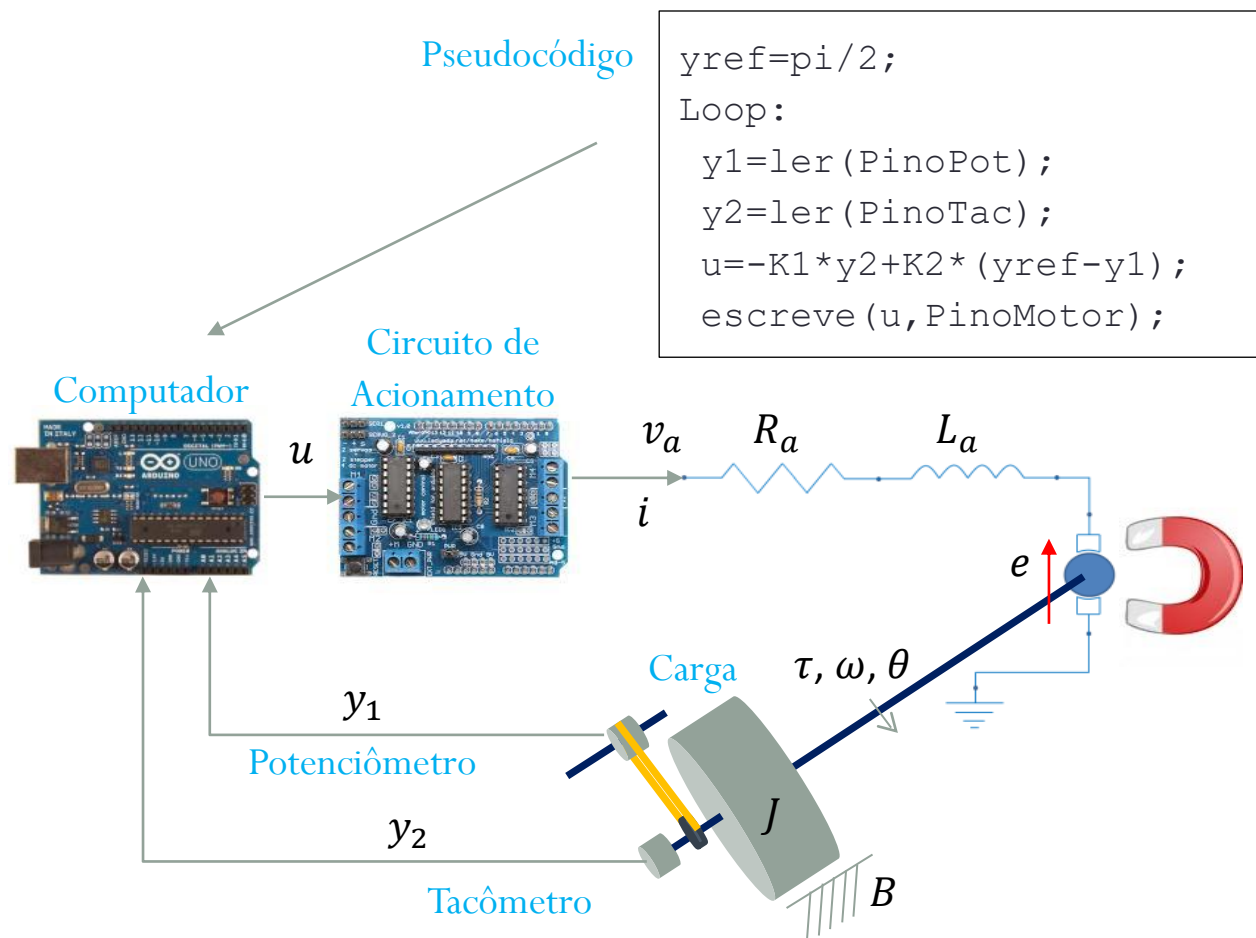
### Realimentação de estados

$$u = -K_1x_1 - K_2x_2 - \dots - K_nx_n$$



# I.4. Projeto de Sistemas de Controle

## I.4.4. Exemplo: Servomecanismo de posição angular



# Realimentação

# I.5. Realimentação

## I.5.1. Conceitos

### Definição:

Em sistemas de controle, a **realimentação** consiste na utilização de medidas de **variáveis que descrevem a dinâmica da planta** para a cálculo da **variável manipulada**.

### Observação:

Em sistemas de controle em **malha fechada**, ocorre a **realimentação** de uma ou mais **variáveis que descrevem a dinâmica da planta**. Dentre essas, geralmente, figura-se a **variável controlada**.

# I.5. Realimentação

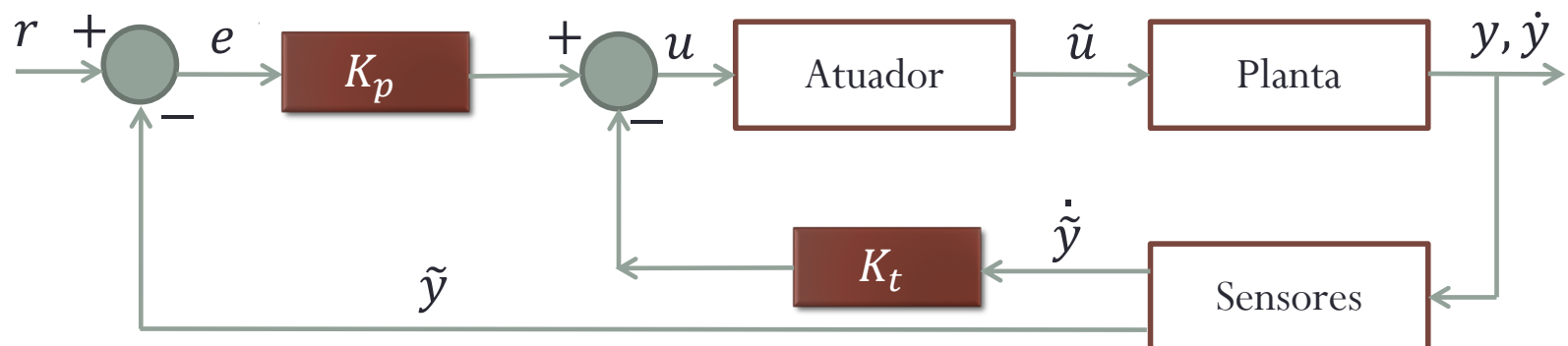
## Tipos de Realimentação:

- **Positiva:** se há um **aumento** (redução) na variável realimentada, a planta é atuada no sentido de **umentá-la** (reduzi-la) ainda mais.

*Exemplo: Circuitos osciladores.*

- **Negativa:** se há um **aumento** (redução) na variável realimentada, a planta é atuada no sentido de **reduzi-la** (umentá-la).

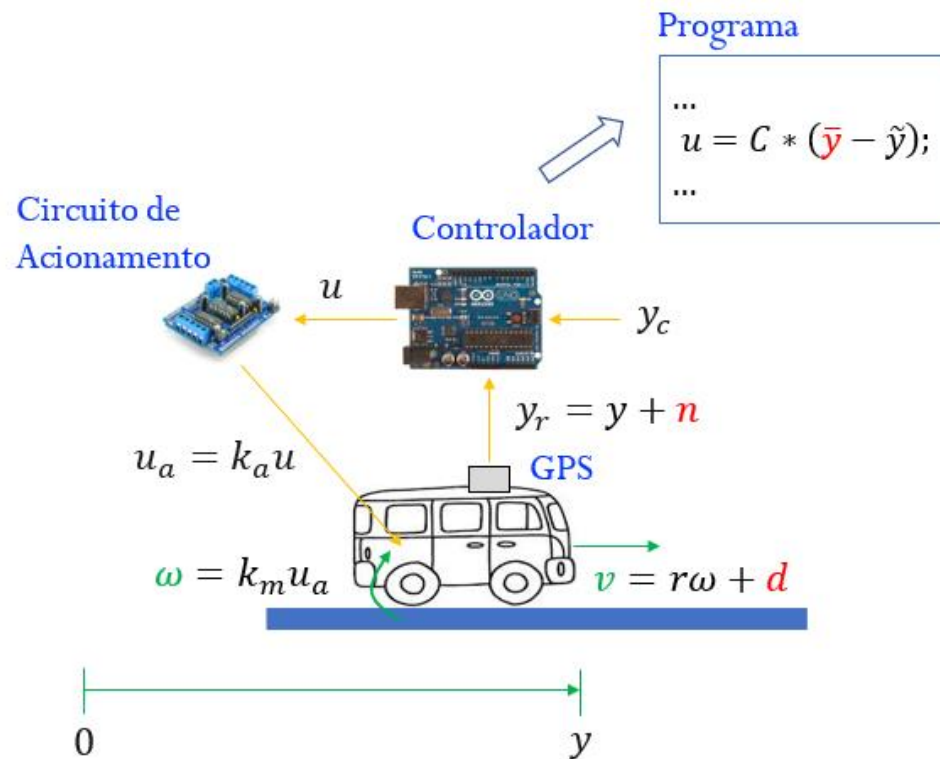
*Exemplo: Sistemas de controle em malha fechada:*



# I.5. Realimentação

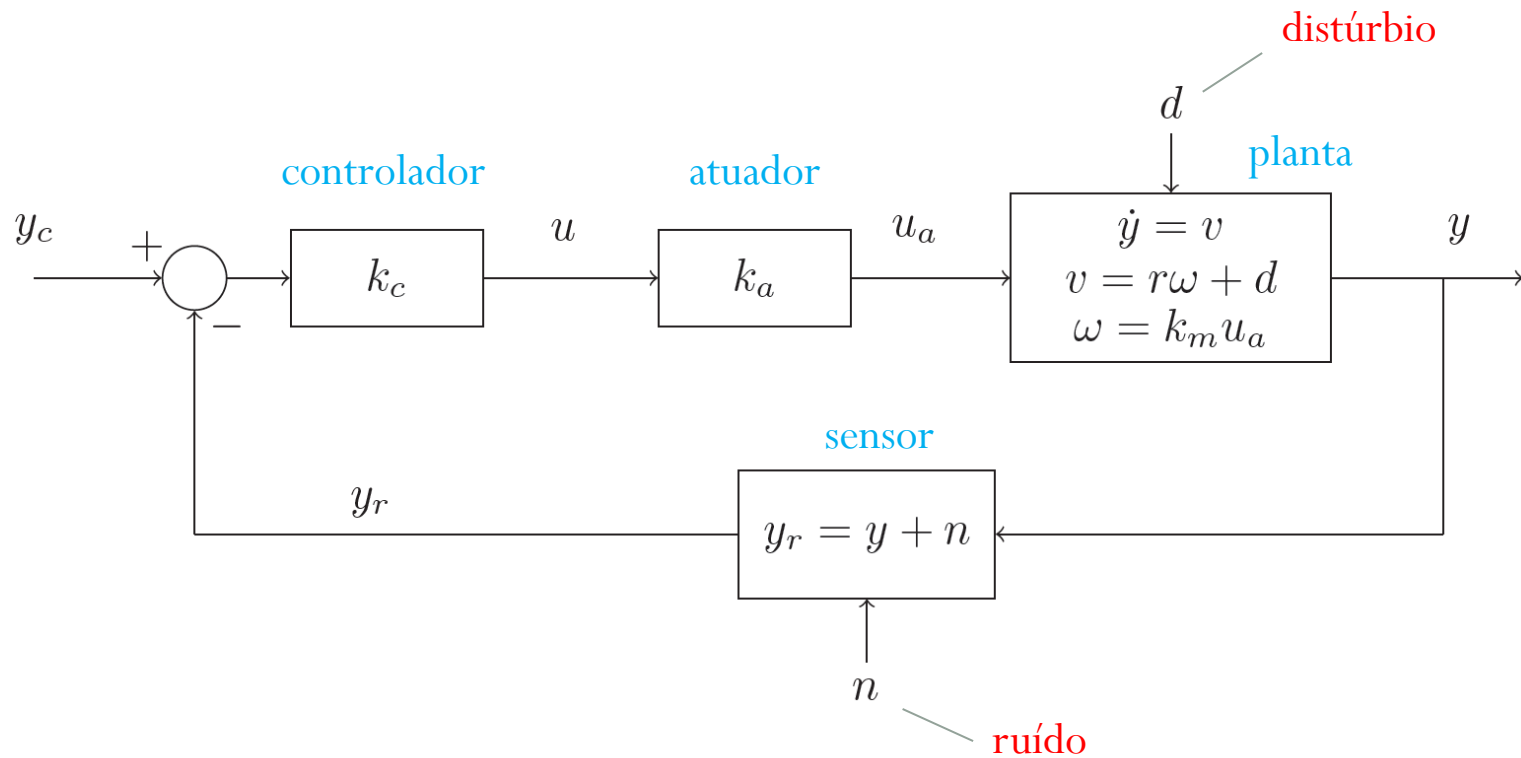
## I.5.2. Exemplo Ilustrativo

*Controle da posição  $y$  do carrinho*



# I.5. Realimentação

(cont.) o diagrama de blocos fica:





# I.5. Realimentação

## I.5.3. Efeitos da Realimentação

- Rapidez de resposta à variável de comando (**bom!**)
- Rejeição de distúrbio de entrada (**bom!**)
- Sensibilidade a ruído de medida (**ruim, mas inevitável!**)
- Aumento de estabilidade (**bom!**)

Usando o exemplo da [Seção I.5.2](#), mostraremos analiticamente esses efeitos (**no quadro branco**).

Obrigado pela presença  
e atenção!