



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA-AERONÁUTICA

MPS-43: SISTEMAS DE CONTROLE

I. INTRODUÇÃO

Prof. Davi Antônio dos Santos (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

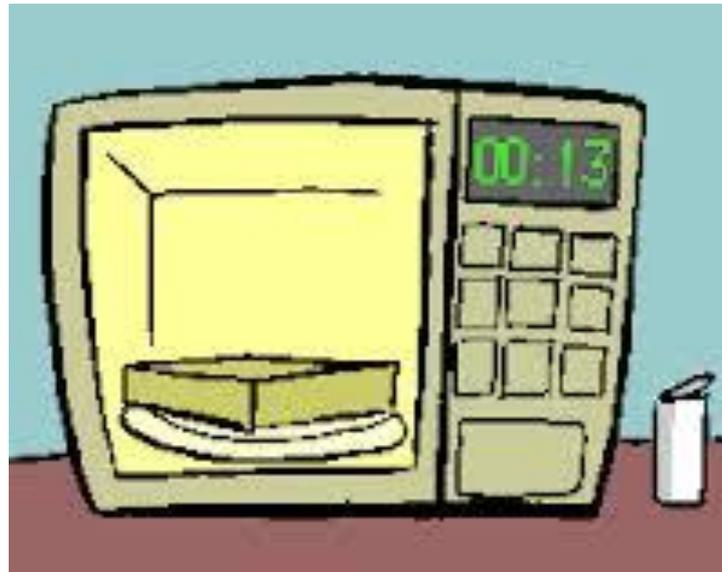
3. Controle de voo de aviões da Primeira Guerra Mundial



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

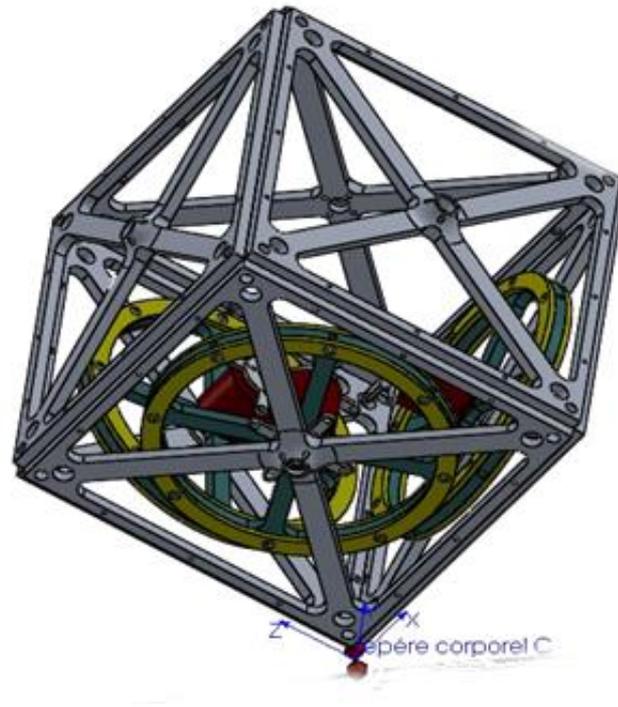
8. Lançadores de Satélites



<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

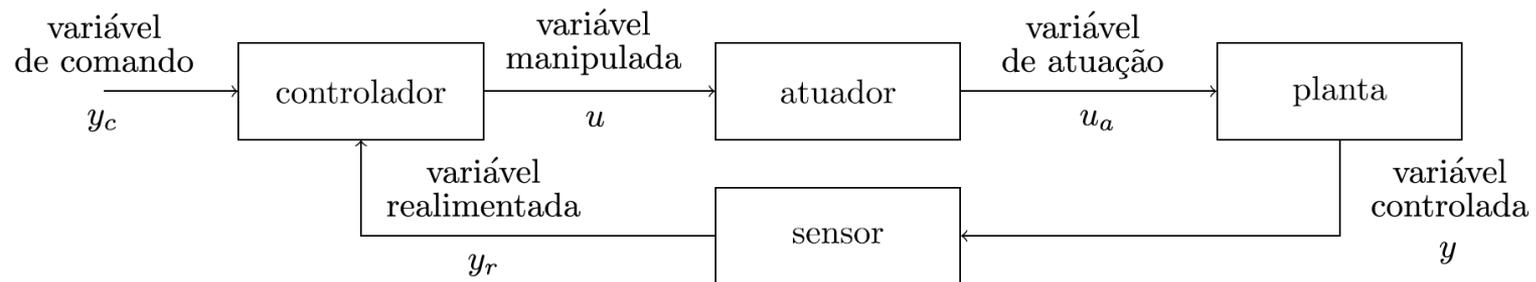
É o componente que **mede a variável controlada**. À medida, dá-se o nome de **variável realimentada**.

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.

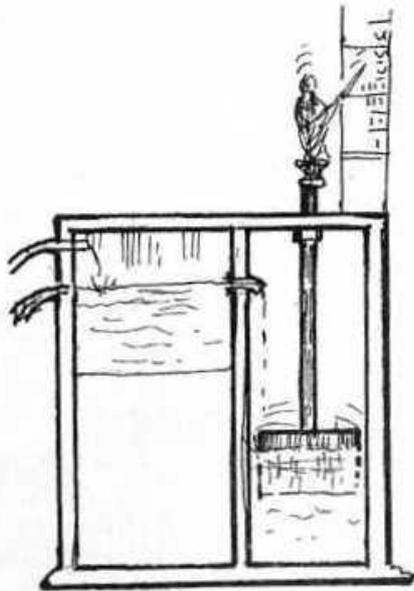
Variáveis de comando: comandos de atitude e posição.



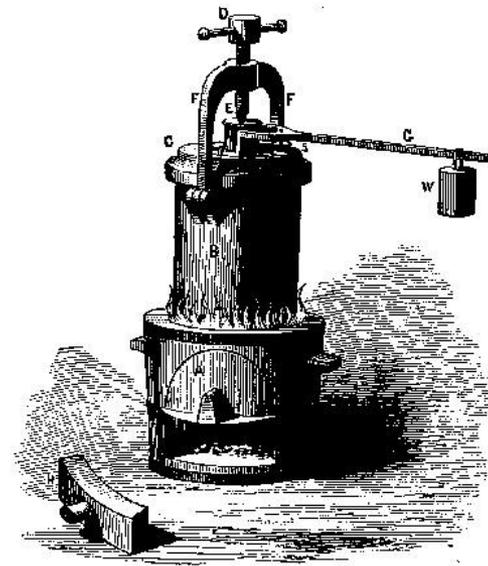
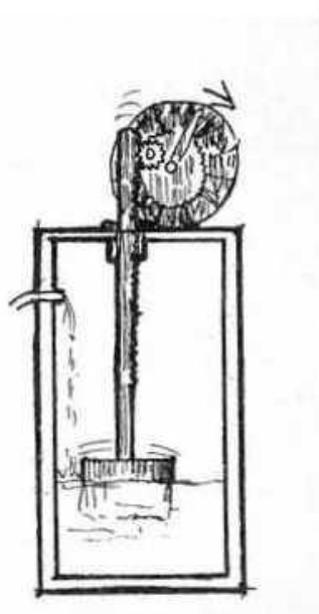
Histórico

I.3. Histórico

Primórdios



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



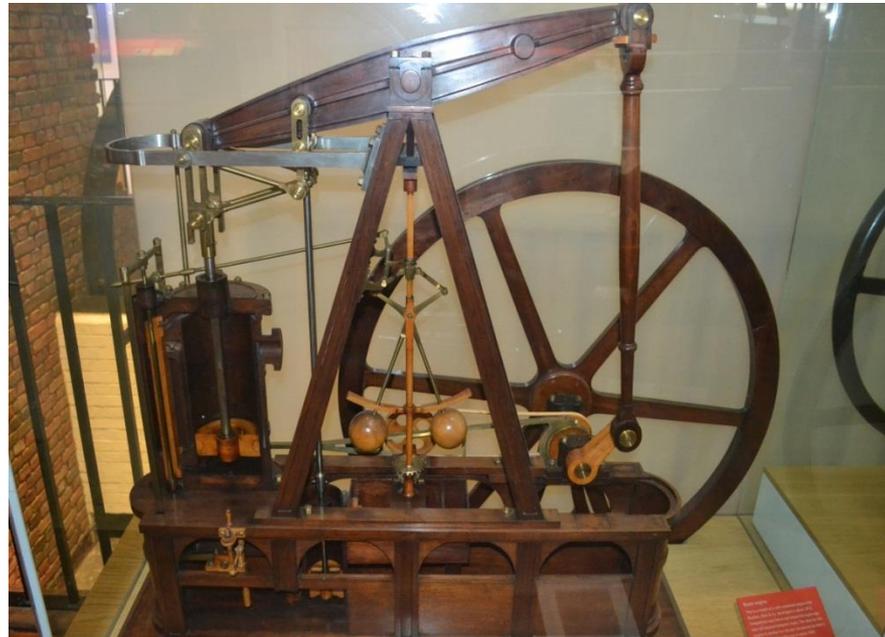
Panela de pressão
Denis Papin
(1647-1712)

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

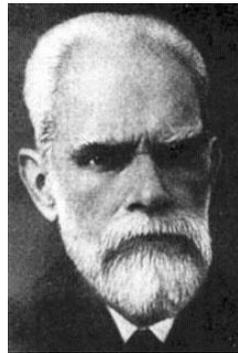


John Routh (1831 - 1907)

Estabilidade de equações de movimento

I.3. Histórico

Teoria de Estabilidade de Lyapunov (1892)



Aleksandr M. Lyapunov
(1857 - 1918)

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

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

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

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

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

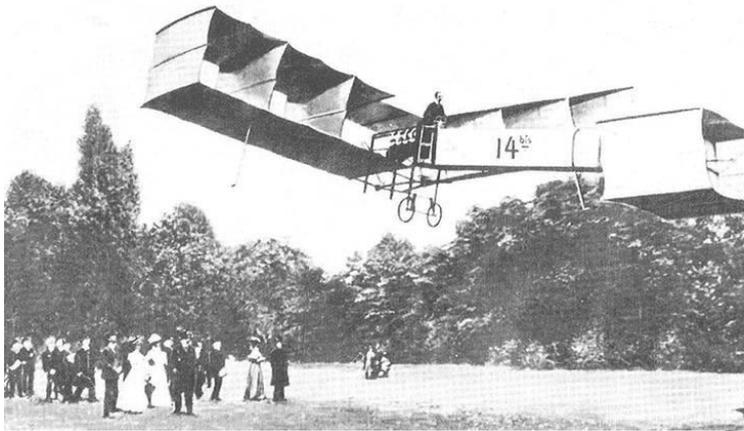
$$\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3) = r \left(1 - \frac{x_1 + x_2 + x_3}{T_{\max}} \right)$$

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

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

I.3. Histórico

Primeiros aviões (1900-1918)



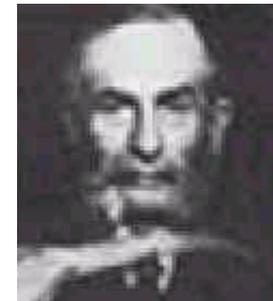
I.3. Histórico

Critério 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			



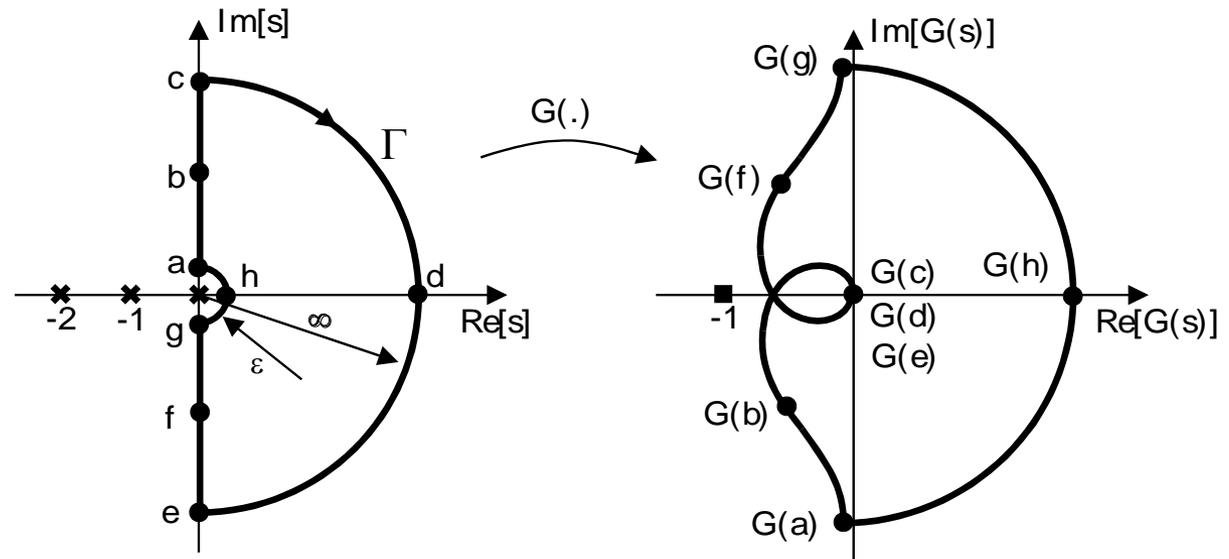
Edward John Routh
(1831 - 1907)

I.3. Histórico

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



Harry Nyquist
(1889-1976)

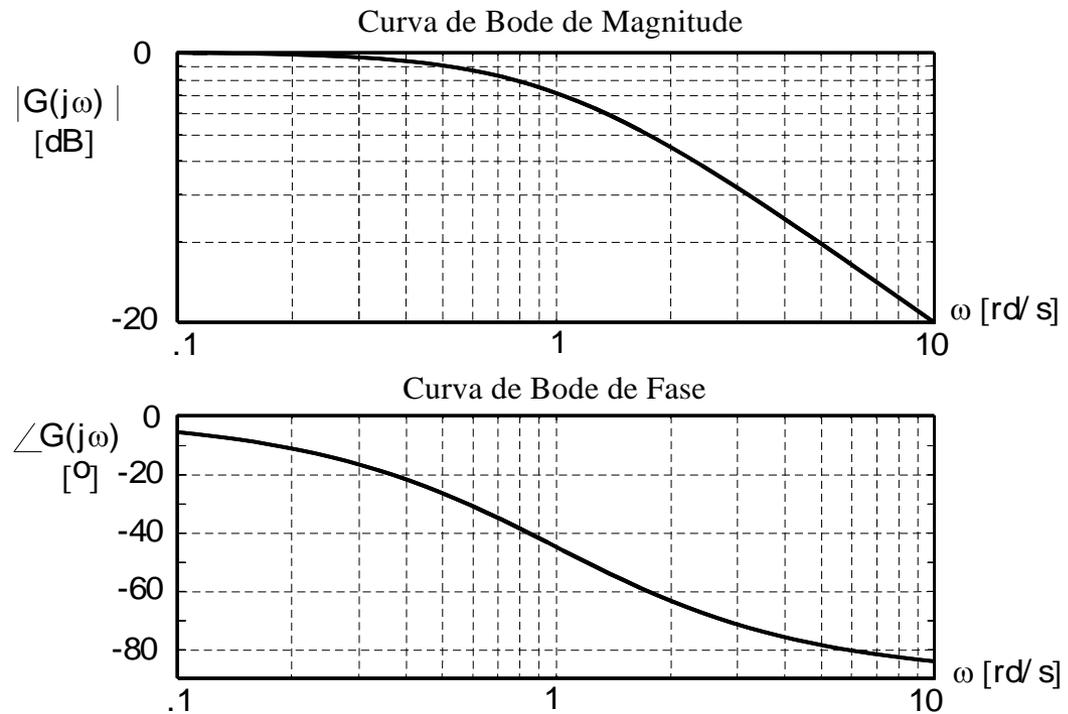


I.3. Histórico

Diagrama de Bode (1938, Bell Labs)



Hendrik Wade Bode
(1905-1982)



I.3. Histórico

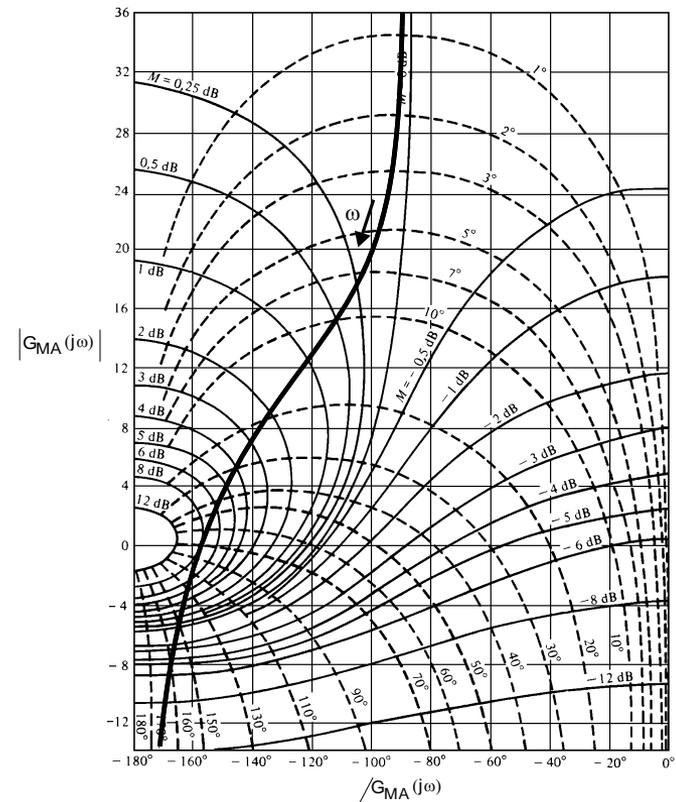
Diagrama de Nichols-Black (década de 1920)



Nathaniel B. Nichols
(1914-1997)



Harold Stephen Black
(1898-1983)

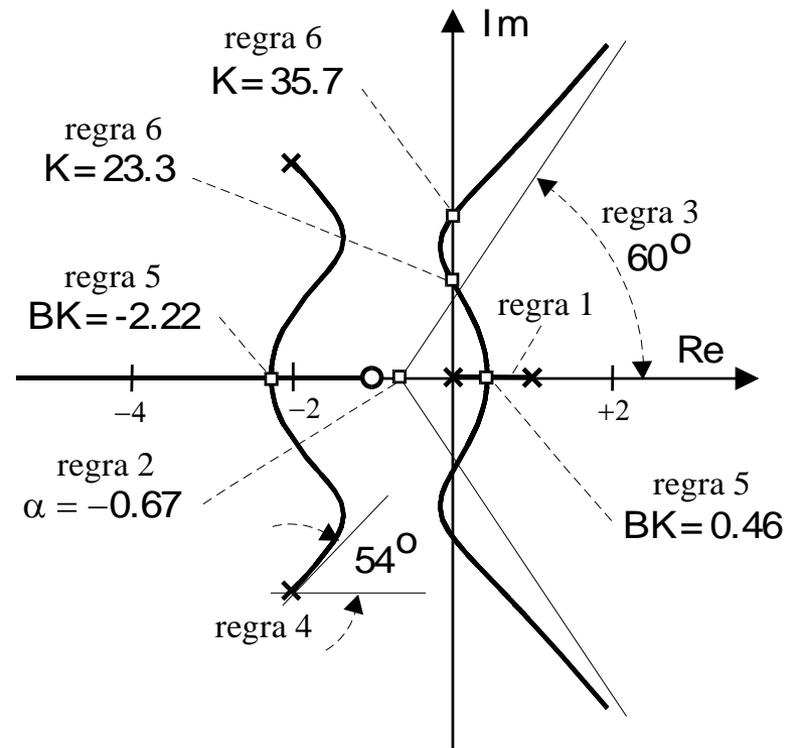


I.3. Histórico

Lugar Geométrico das Raízes (1948)

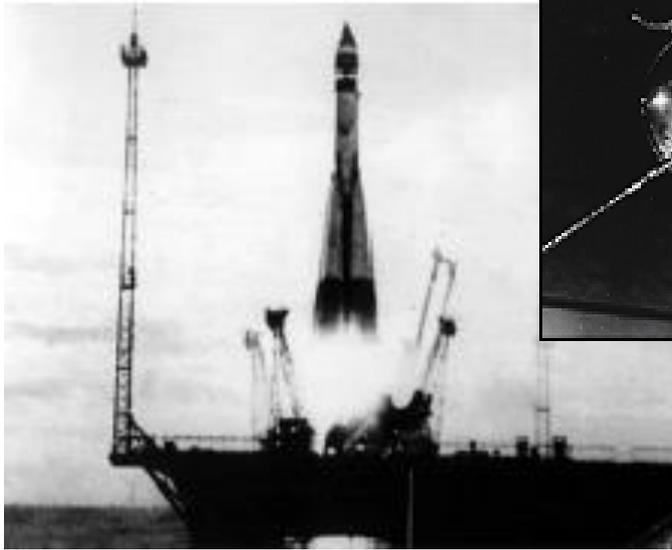


Walter R. Evans
(1920-1999)

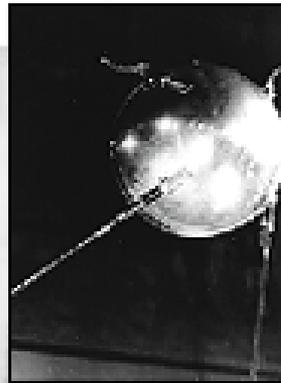


I.3. Histórico

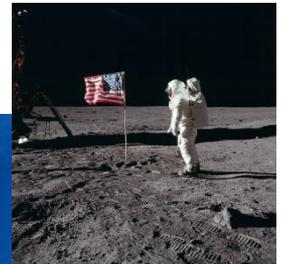
Corrida Espacial



Sputnik I
1957

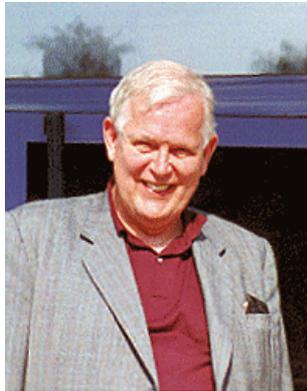


Apollo 11
1969



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:



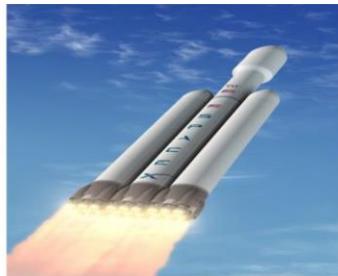
(a)



(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

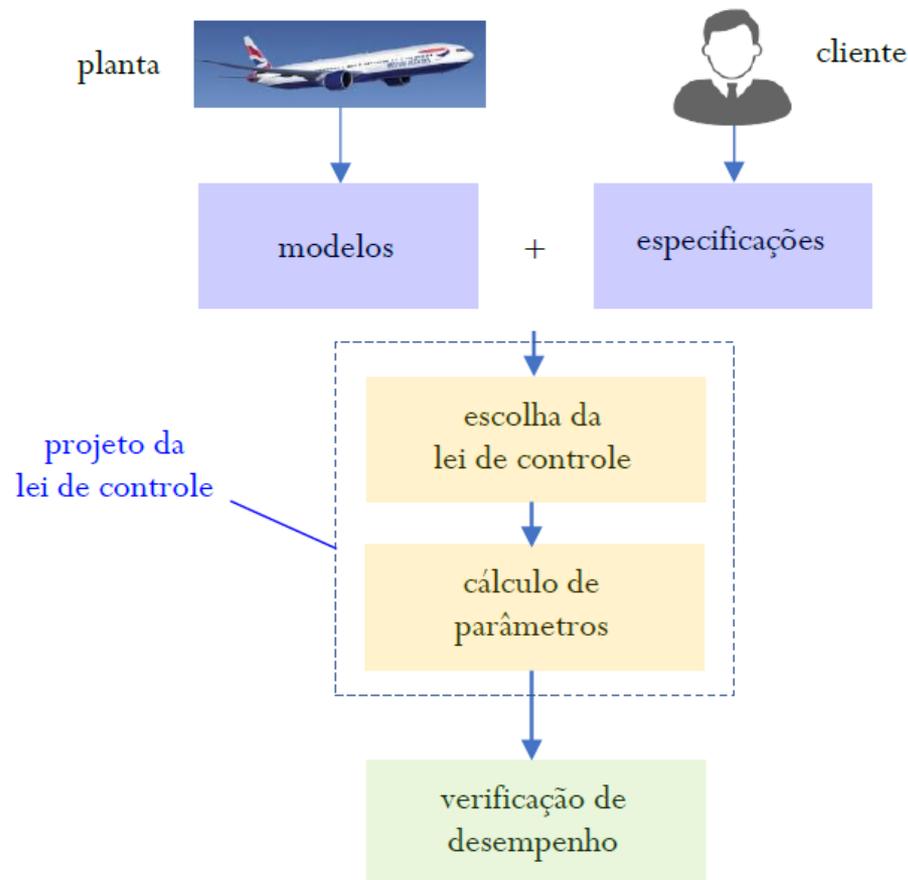
- **Hardware:** escolha e dimensionamento dos sensores, atuadores, computador embarcado e interfaces.
- **Modelagem e identificação:** formulação de modelos dinâmicos e estimação de seus parâmetros a partir de testes experimentais.
- **Software:** implementação de uma estrutura de software para o computador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

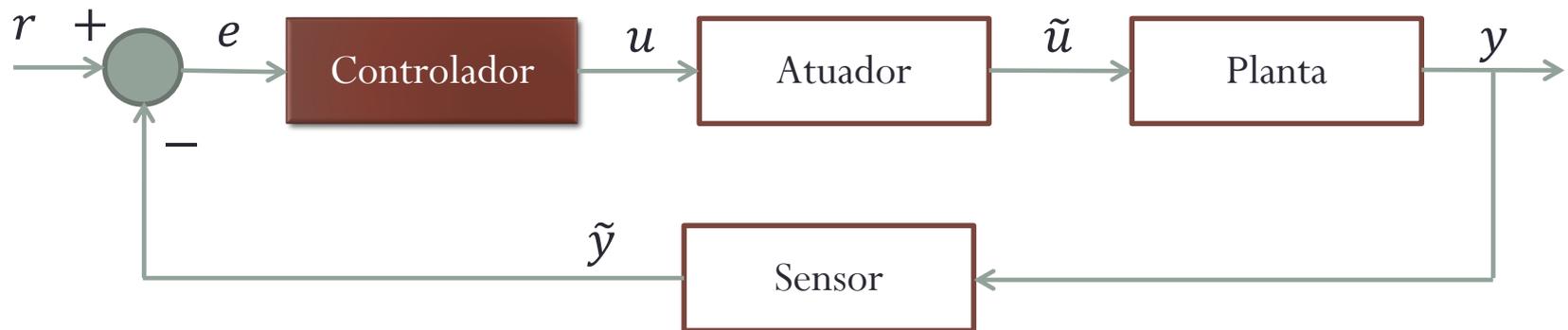
I.4.2. Procedimento Geral



I.4. Projeto de Sistemas de Controle

I.4.3. Tipos de Lei de Controle

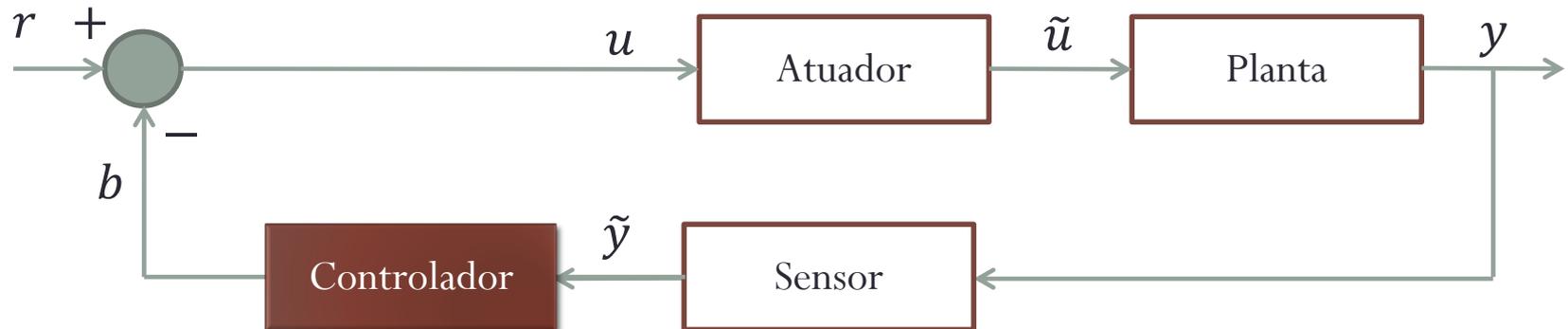
Em cascata



I.4. Projeto de Sistemas de Controle

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

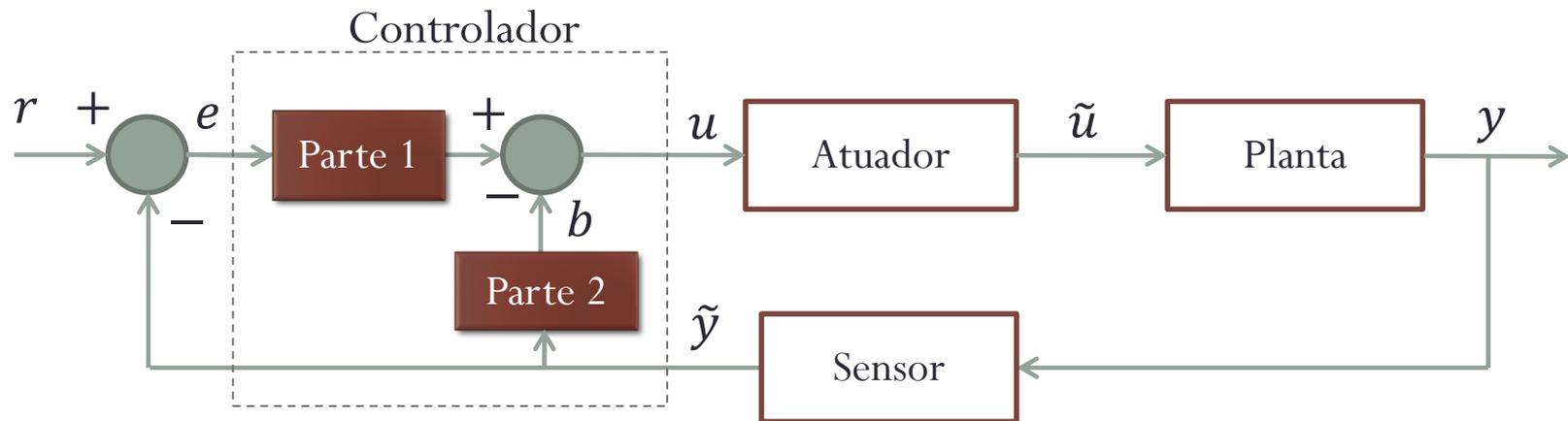
Na realimentação



I.4. Projeto de Sistemas de Controle

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

“Misto”

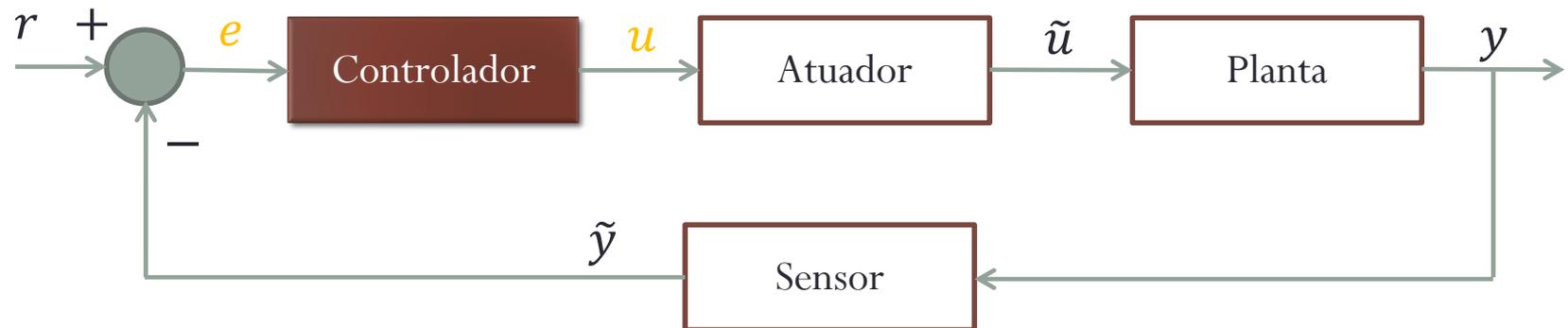


I.4. Projeto de Sistemas de Controle

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

Linear x Não Linear

Seja a seguinte malha de controle com controlador em cascata:



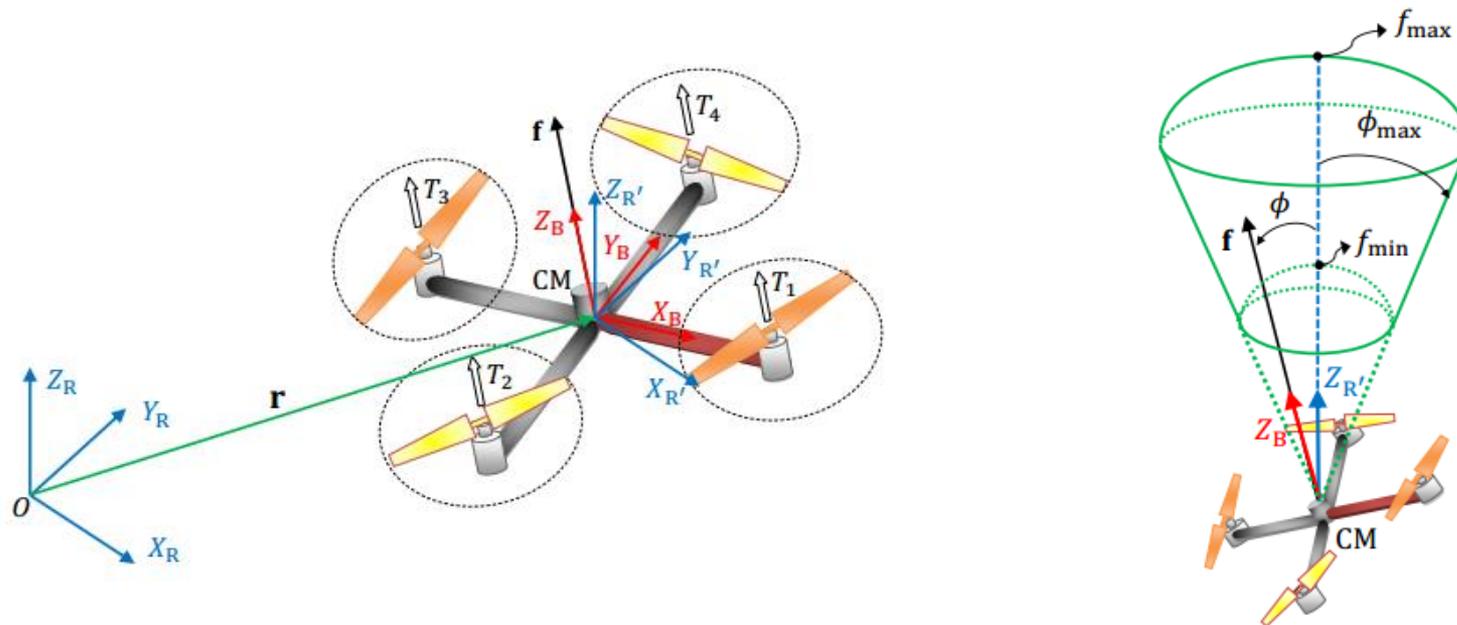
Controlador Linear: A relação entre e e u é *linear*.

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.

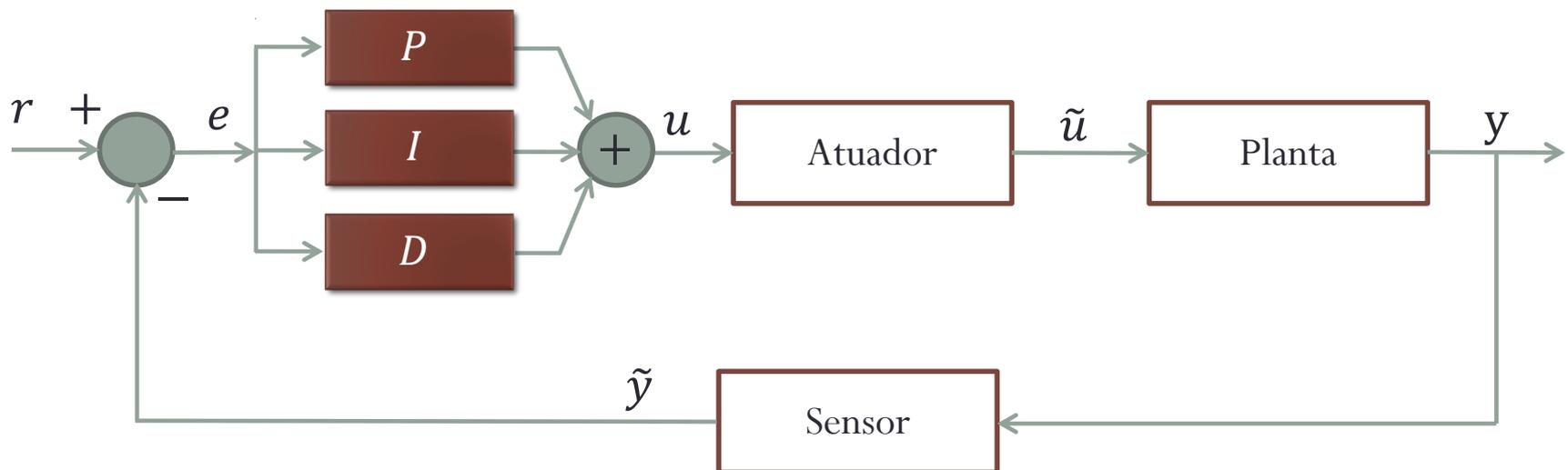


I.4. Projeto de Sistemas de Controle

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

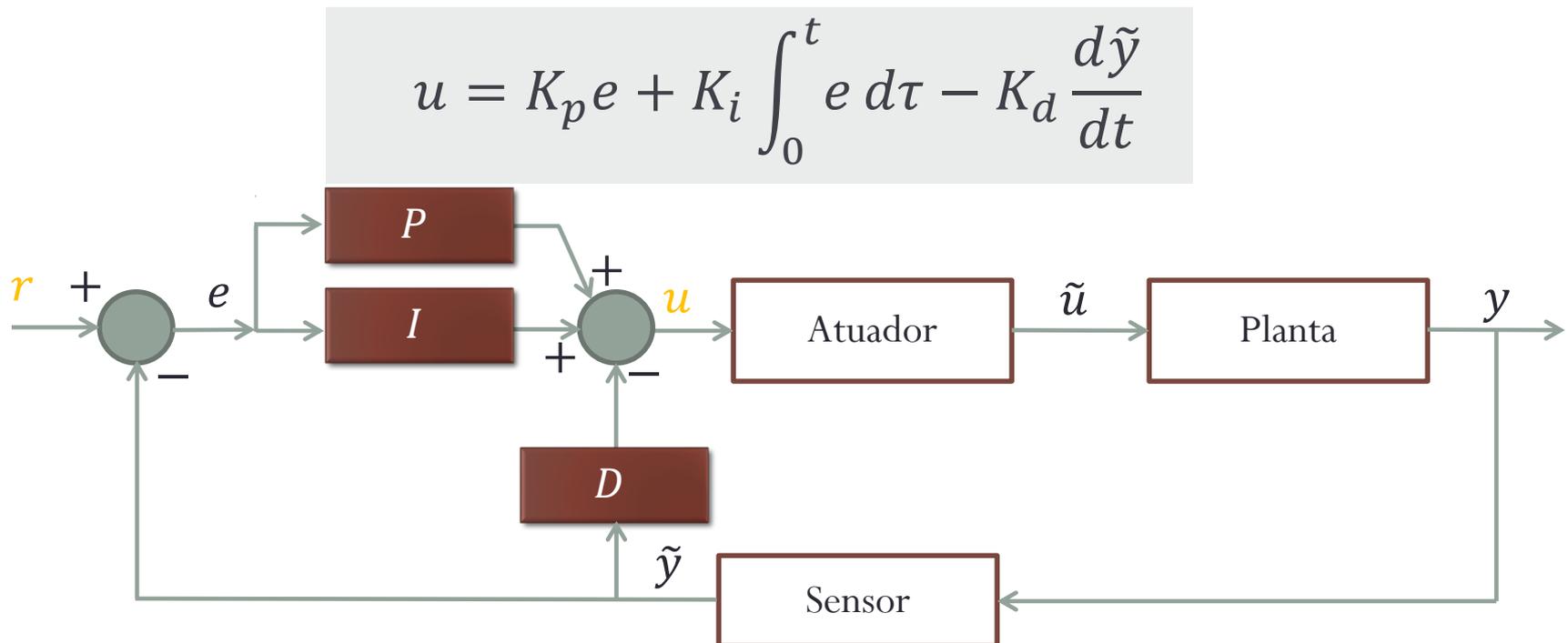
$$u = K_p e$$

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

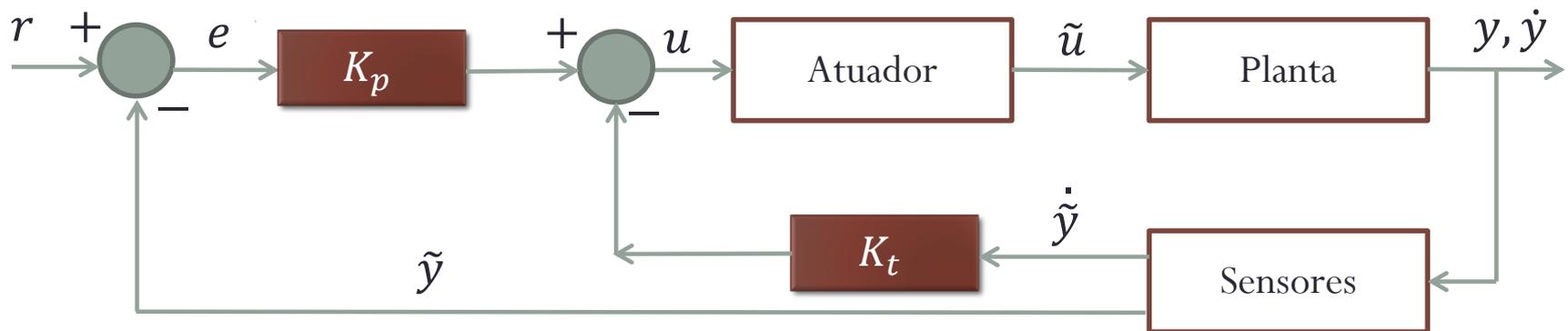
$$u = K_p e - K_d \frac{d\tilde{y}}{dt}$$

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

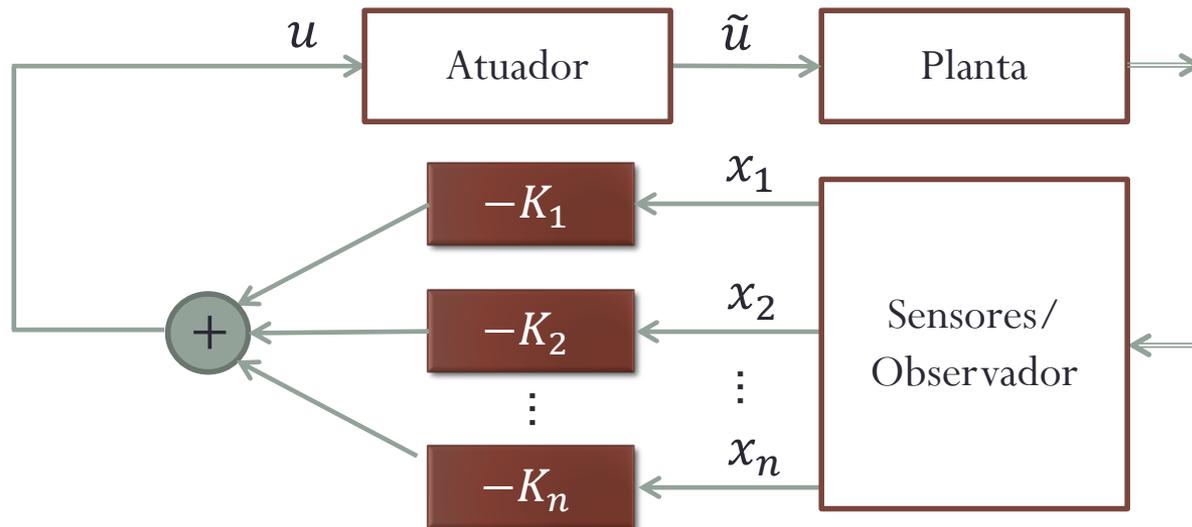
O controlador **Lead** é usado para melhorar a **estabilidade relativa** do sistema, enquanto o **Lag** é usado para melhorar a **acuidade em regime permanente**.

I.4. Projeto de Sistemas de Controle

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

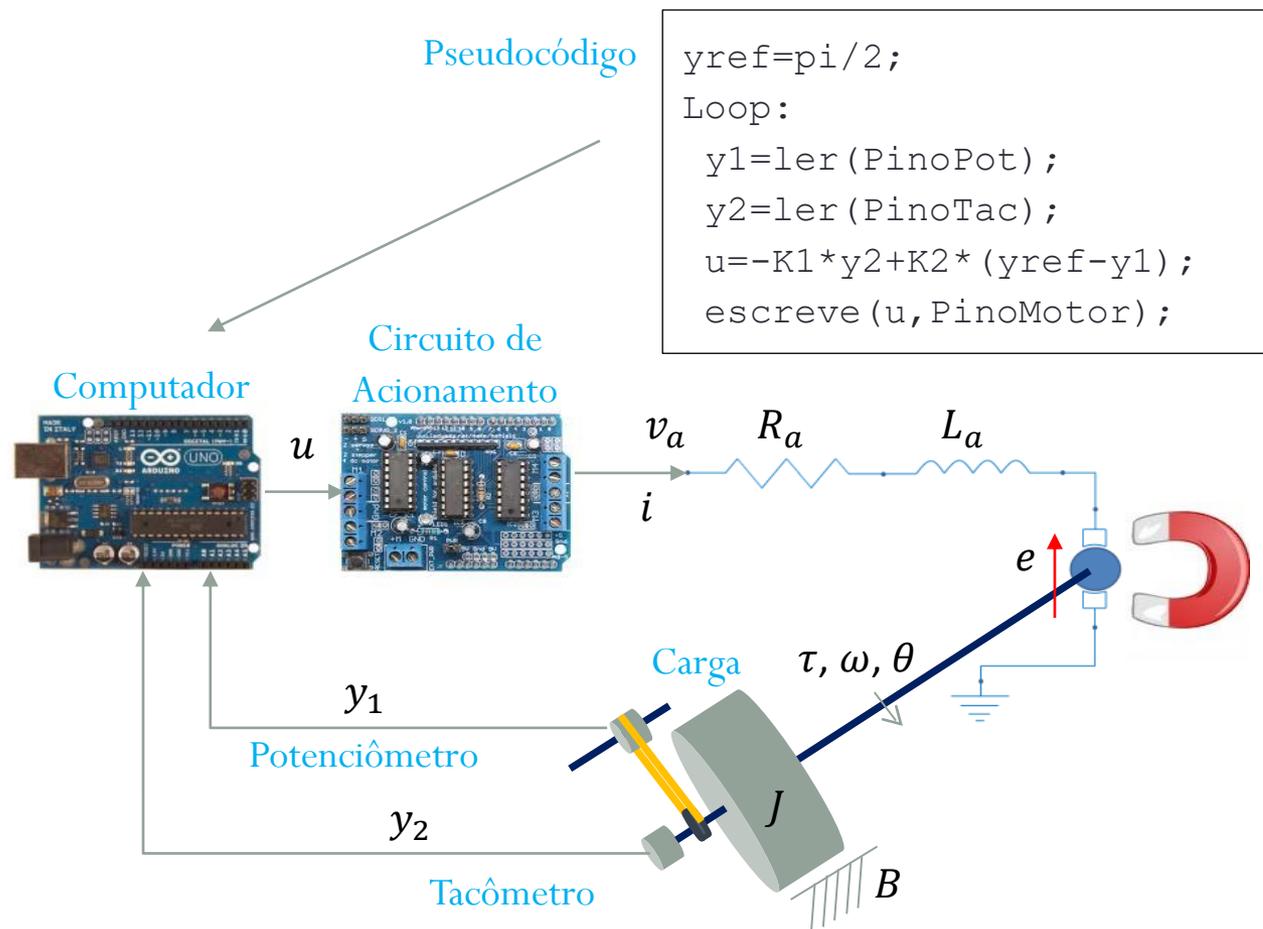
Realimentação de estados

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



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

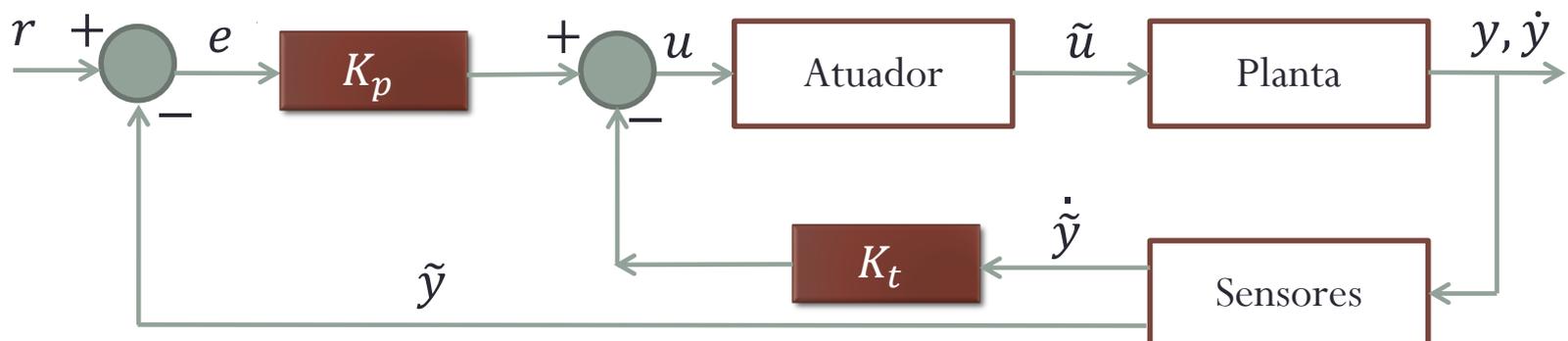
Tipos de Realimentação:

- **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).

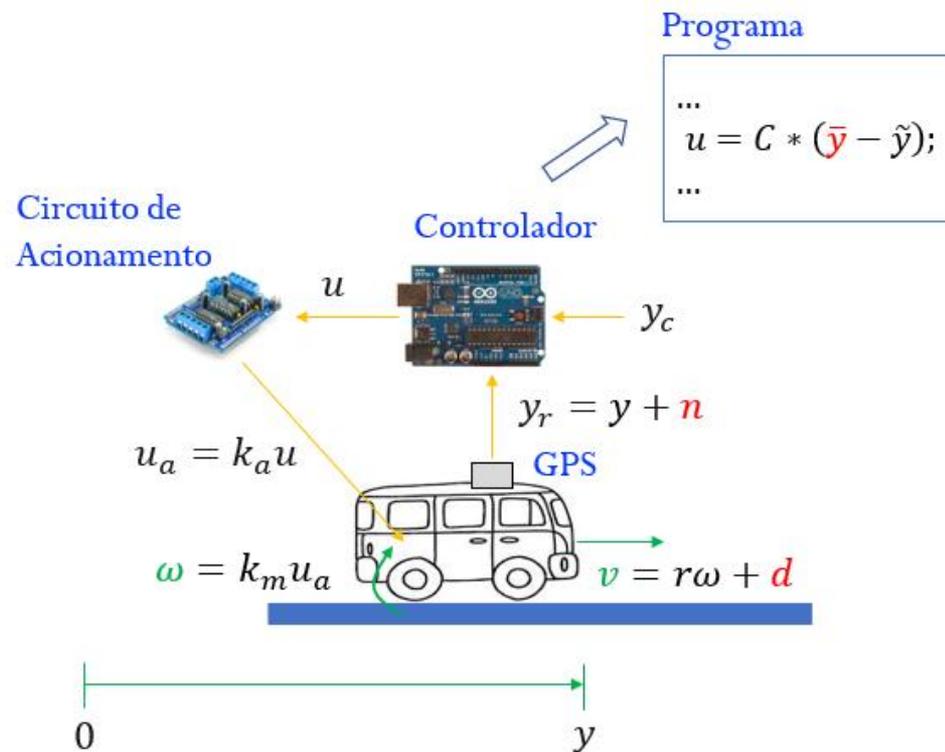
Exemplo: Sistemas de controle em malha fechada:



I.5. Realimentação

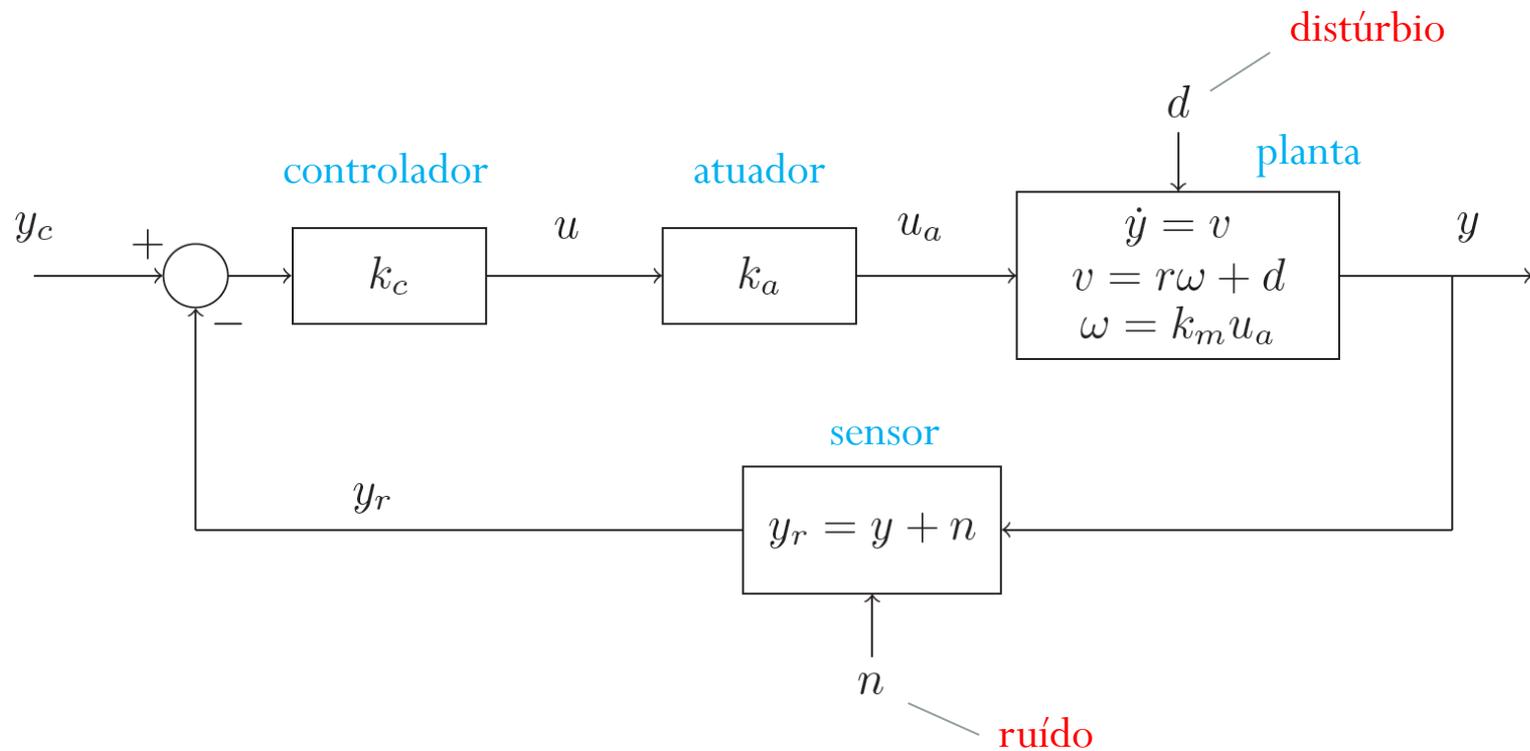
I.5.2. Exemplo Ilustrativo

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!