

# SEM 536 - Sistemas de Controle I

## Aula 1 - Introdução

Adriano A. G. Siqueira

Universidade de São Paulo

- O que é Controle?
- Como representar um Sistema de Controle?
- Qual a importância da realimentação?

# O que é Controle?

Dicionário Houaiss:

- Controle: ... 3. Dispositivo ou mecanismo destinado a **comandar** ou **regular** o funcionamento de máquina, aparelho ou instrumento.
- Controlar: exercer **ação** restritiva sobre, conter, **regular**, dominar, **comandar**.

Controlar é fazer com que uma **variável** de um **sistema** assuma um valor desejado (**referência**, comando) por meio de uma **ação** no sistema

# O que é Controle?

**Sistema:** conjunto de elementos que atuam entre si com a finalidade de atingir um objetivo (**planta** ou **processo**)

Ex.: automóvel, econômico, robô, químico.

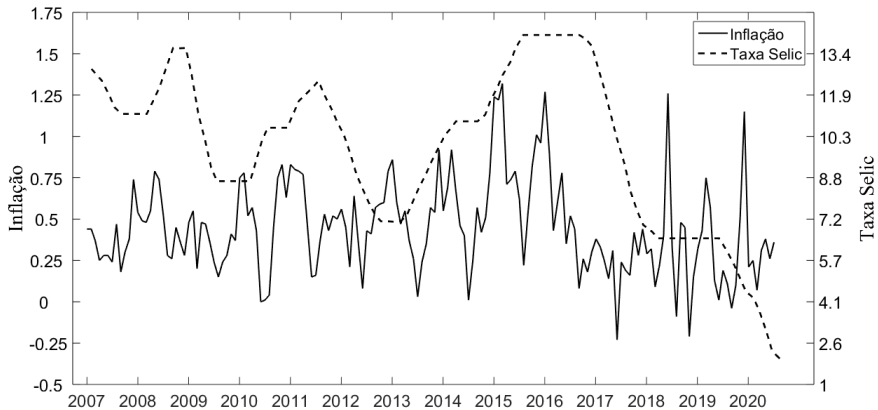
**Variável:** indica o comportamento do sistema ao longo do tempo

Ex.: velocidade, inflação, posição/força, composição.

**Ação** (de controle): meio de se alterar o comportamento do sistema

Ex.: ângulo do acelerador, taxa de juros, tensão nos motores, abertura da válvula.

# Sistema econômico



# O que é Controle?

Controle manual: homem + máquina

Ex.: dirigir um automóvel.

Controle automático: apenas máquina

Ex.: piloto automático.

# O que é Controle?

**Realimentação:** leitura da variável controlada e utilização desta informação para alterar seu valor

Ex.: visão ao dirigir um automóvel.

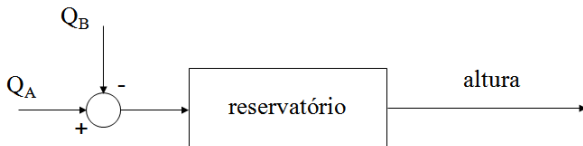
**Malha Aberta:** sistema sem realimentação.

**Malha Fechada:** sistema realimentado.

# Diagrama de Blocos - Exemplo

## Controle de Nível de um Reservatório

- Sistema (Planta): reservatório de água
- Variável controlada (Saída): altura do nível de água
- Entrada: vazão na bomba de reposição da água ( $Q_A$ )
- Distúrbio: vazão na bomba de retirada de água ( $Q_B$ )

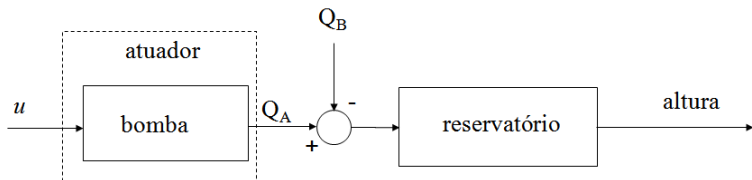




# Diagrama de Blocos - Exemplo

## Controle de Nível de um Reservatório

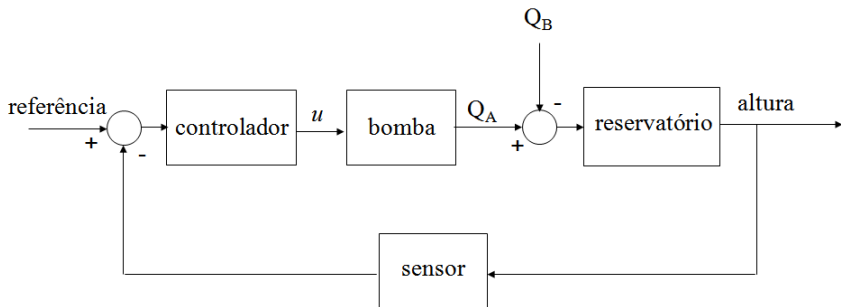
- Atuador: bomba
- Ação de Controle: tensão aplicada na bomba ( $u$ )



# Diagrama de Blocos - Exemplo

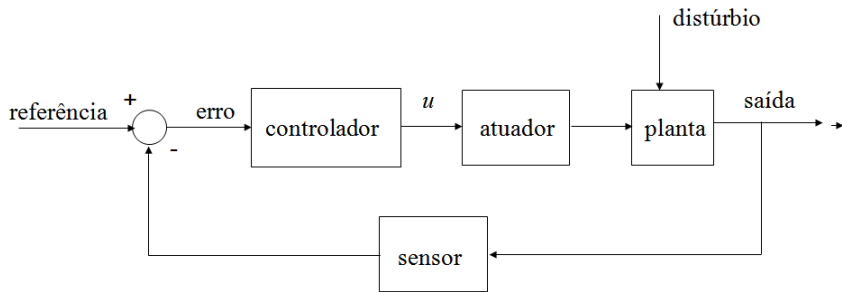
## Controle de Nível de um Reservatório

- Sensor: sensor de pressão (altura/pressão  $\rightarrow$  tensão)
- Referência: altura desejada
- Controlador: gera a ação de controle



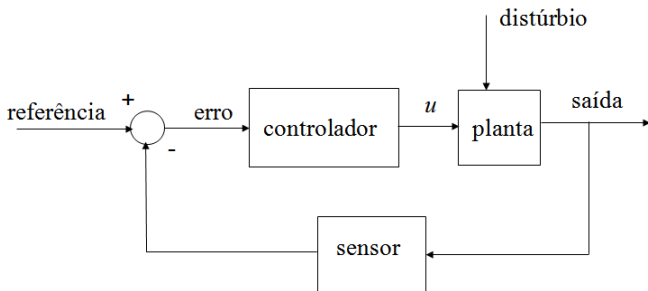
# Diagrama de Blocos - Exemplo

Estrutura básica de um sistema realimentado



# Diagrama de Blocos - Exemplo

Estrutura básica de um sistema realimentado



# Malha Aberta X Malha Fechada

*Feedforward* (Malha Aberta) X *Feedback* (Malha Fechada)

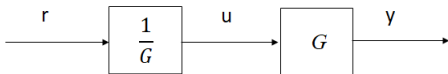
Planta  $G$  (estática):  $y = Gu$

Objetivo:  $y$  deve assumir um valor desejado (referência) de  $r$

Primeira solução - Controle em Malha Aberta:  $u = \frac{1}{G}r$

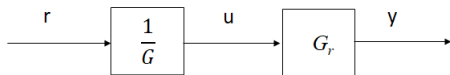
Resultado:  $y = G\frac{1}{G}r \Rightarrow y = r$

Erro:  $e = r - y = 0$



# Malha Aberta X Malha Fechada

Incerteza na planta de 10%:  $G_r = 0,9G$



Planta real:  $y = G_r u$

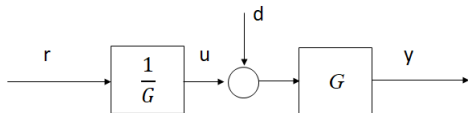
Controle em Malha Aberta:  $u = \frac{1}{G} r$

Resultado:  $y = G_r \frac{1}{G} r = 0,9G \frac{1}{G} r \Rightarrow y = 0,9r$

Erro:  $e = r - y = 0,1r$

# Malha Aberta X Malha Fechada

Distúrbio na entrada:  $d$



Planta:  $y = G(u + d)$

Controle em Malha Aberta:  $u = \frac{1}{G}r$

Resultado:  $y = G(u + d) = G\frac{1}{G}r + Gd \Rightarrow y = r + Gd$

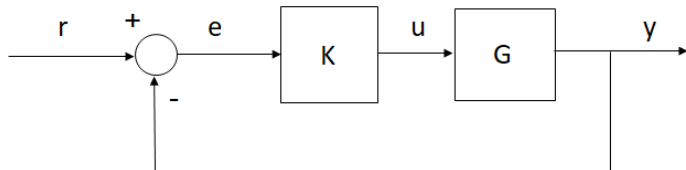
Erro:  $e = r - y = -Gd$

# Malha Aberta X Malha Fechada

Planta:  $y = Gu$

Controle em Malha Fechada

Controlador Proporcional:  $u = Ke = K(r - y)$





# Malha Aberta X Malha Fechada

Planta:  $y = Gu$

Controle em Malha Fechada:  $u = Ke = K(r - y)$

Resultado:

$$y = Gu$$

$$y = GK(r - y)$$

$$y = GKr - GK y$$

$$y + GK y = GK r$$

$$(1 + GK)y = GK r$$

$$y = \frac{GK}{1 + GK} r$$

Resultado (Equação mais importante da disciplina):

$$y = \frac{GK}{1 + GK} r$$

Erro:

$$e = r - y$$

$$e = r - \frac{GK}{1 + GK} r$$

$$e = \frac{1}{1 + GK} r$$

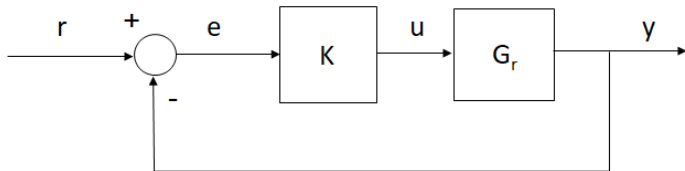
Se o ganho  $K$  é grande  $\Rightarrow$  o erro é pequeno, embora não nulo

# Malha Aberta X Malha Fechada

Incerteza na planta de 10%:  $G_r = 0,9G$

Planta real:  $y = G_r u$

Controle em Malha Fechada:  $u = Ke = K(r - y)$



# Malha Aberta X Malha Fechada

Incerteza na planta de 10%:  $G_r = 0,9G$

Planta real:  $y = G_r u$

Controle em Malha Fechada:  $u = Ke = K(r - y)$

Resultado:

$$y = G_r u$$

$$y = 0,9GK(r - y)$$

$$y = 0,9GKr - 0,9GKy$$

$$y + 0,9GKy = 0,9GKr$$

$$(1 + 0,9GK)y = 0,9GKr$$

$$y = \frac{0,9GK}{1 + 0,9GK} r$$

Resultado:

$$y = \frac{0,9GK}{1 + 0,9GK}r$$

Erro:

$$e = r - y$$

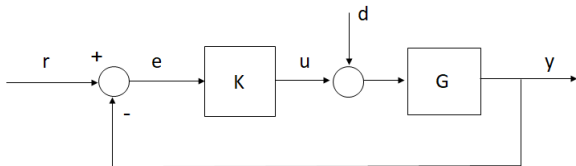
$$e = r - \frac{0,9GK}{1 + 0,9GK}r$$

$$e = \frac{1}{1 + 0,9GK}r$$

Se o ganho  $K$  é grande  $\Rightarrow$  o erro é pequeno, “independente” da incerteza

# Malha Aberta X Malha Fechada

Distúrbio na entrada:  $d$



Resultado:

$$y = G(u + d)$$

$$y = GK(r - y) + Gd$$

$$y = GKr - GK y + Gd$$

$$y + GK y = GKr + Gd$$

$$(1 + GK)y = GKr + Gd$$

$$y = \frac{GK}{1 + GK} r + \frac{G}{1 + GK} d$$

Resultado:

$$y = \frac{GK}{1 + GK}r + \frac{G}{1 + GK}d$$

Erro:

$$e = r - y$$

$$e = r - \frac{GK}{1 + GK}r - \frac{G}{1 + GK}d$$

$$e = \frac{1}{1 + GK}r - \frac{G}{1 + GK}d$$

Se o ganho  $K$  é grande  $\Rightarrow$  o erro devido ao distúrbio é pequeno

*Feedforward* (Malha Aberta) X *Feedback* (Malha Fechada)

Controle do motor de corrente contínua - Videoaula

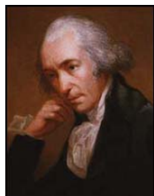
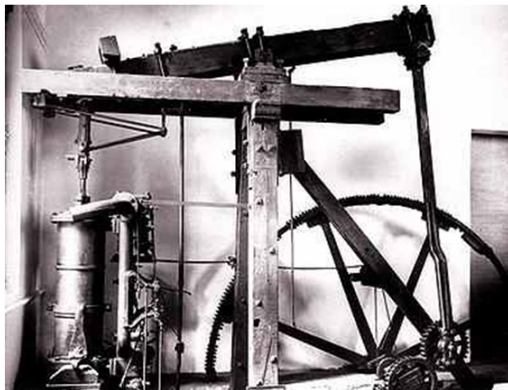
Objetivo: alcançar e manter a posição em  $45^\circ$

- Iniciar na posição  $0^\circ$
- Movimentar até a posição  $45^\circ$
- Manter a posição em  $45^\circ$

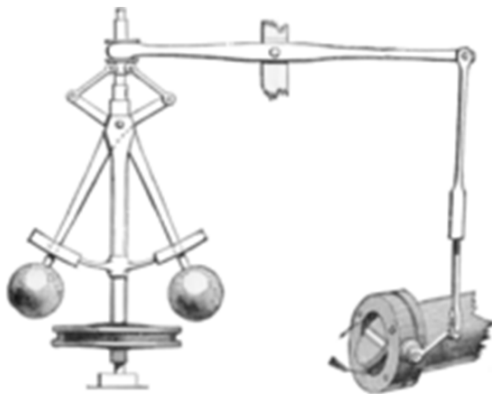


James Watt (1736 – 1819)

1788: Controle de velocidade de um motor a vapor



## Controlador centrífugo (*fly-ball*)



James Clerk Maxwell (1831 – 1879)

- Primeiro estudo sistemático do controlador centrífugo de Watt
- Artigo: *On Governors* (1868)
- Estabilidade depende das raízes de uma equação característica do sistema
- Raízes devem ter parte real negativa



E. J. Routh (1831 – 1907)

- Adams Prize of 1877
- Critério de Estabilidade de Routh



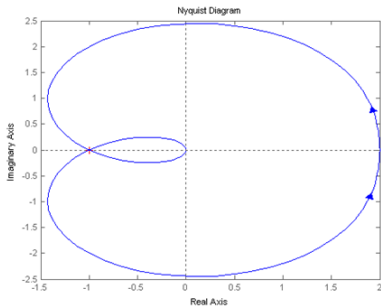
A. M. Lyapunov (1857 – 1917)

- Estabilidade de sistemas não lineares (1890)
- Aplicação apenas após 1958



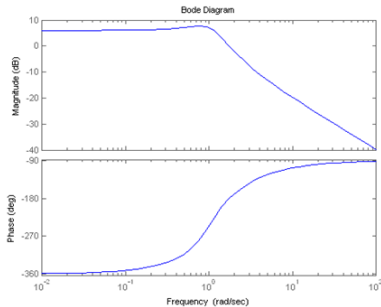
## H. Nyquist (1889 – 1976)

- Amplificadores eletrônicos
- Bell Telephone Laboratories
- 1923: Critério de Estabilidade de Nyquist



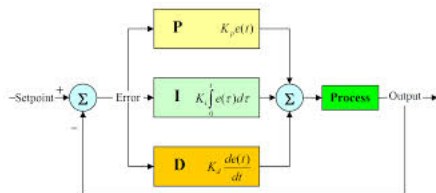
## Hendrik W. Bode (1905 – 1982)

- 1938: Resposta em frequência
- Gráficos de Bode
- Margens de estabilidade



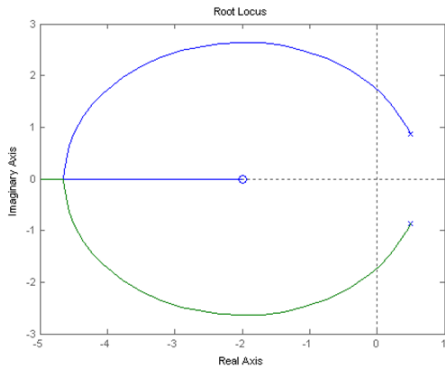
Challender, A., Hartree, DR. and Porter, A. (1936) Time lag in a control system, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A mathematical and Physical Sciences, 235, pp. 415–444.

- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)
- Trabalho experimental
- 1942: Método de Ziegler-Nichols



Walter R. Evans (1920 – 1999)

- 1948: Lugar da raízes





L. S. Pontryagin (1908 – 1988)

- 1956: Princípio do Mínimo



R. Bellman

- 1958: Programação Dinâmica
- Problema do caixeiro viajante

Rudolf E. Kalman (1930 – 2016)

- 1960: Controlador e Estimador Ótimos



Uso de computadores (Controle Digital)  
Espaço de estados (Controle Moderno)  
Corrida Espacial

George Zames (1934 – 1997)

- 1966: Teorema do ganho pequeno
- 1980: Controle Robusto –  $H_\infty$

