



PMR3404

Aula 1

Introdução os sistemas de controle

Newton Maruyama

10 de março de 2017

PMR-EPUSP

1. Introdução
2. Sistemas de controle: malha aberta versus malha fechada
3. Uma análise do conceito de malha fechada
4. Sistemas de controle: requisitos de desempenho
5. O problema de controle redefinido
6. Conclusões fundamentais
7. Fatos históricos, Exemplos

Introdução

- Um sistema de controle é uma interconexão de vários componentes resultando numa configuração que fornece um desempenho desejado.
- A descrição do sistema se refere à relação causal entre a entrada e a saída do sistema, em geral, descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência, etc.

Um sistema ou processo a ser controlado pode ser representado como um diagrama de blocos como o da Figura 1.

Onde:

- $U(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de entrada $u(t)$,
- $Y(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de saída $y(t)$ e
- $G(s)$ é a transformada de Laplace da resposta impulsiva do sistema $g(t)$.

$$G(s) = \mathcal{L}[g(t)] = \frac{Y(s)}{U(s)}. \quad (1)$$

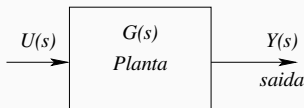
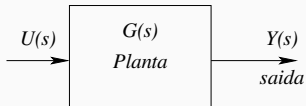


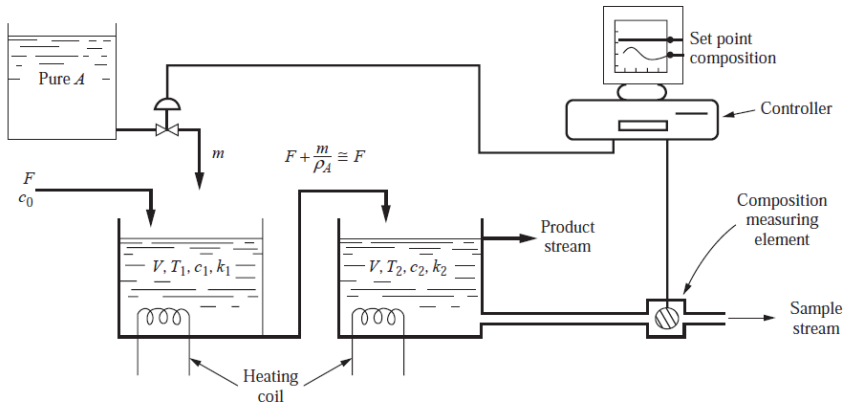
Figura 1: Representação de um sistema ou processo a ser controlado.

O problema básico de controle

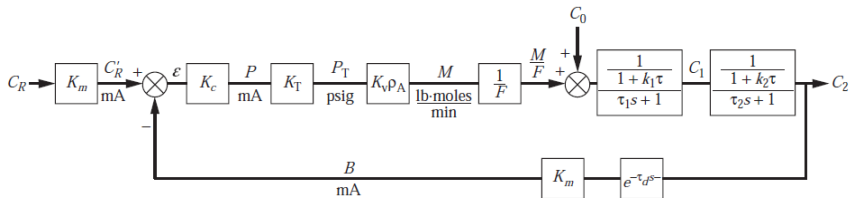
- Sintetizar um sinal de entrada $u(t)$ tal que o sinal de saída $y(t)$ possua um comportamento desejado.



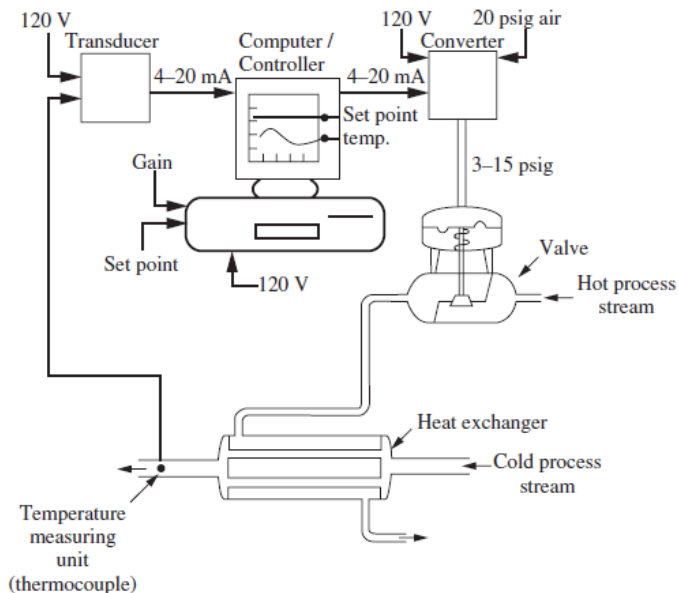
Exemplo: reator químico



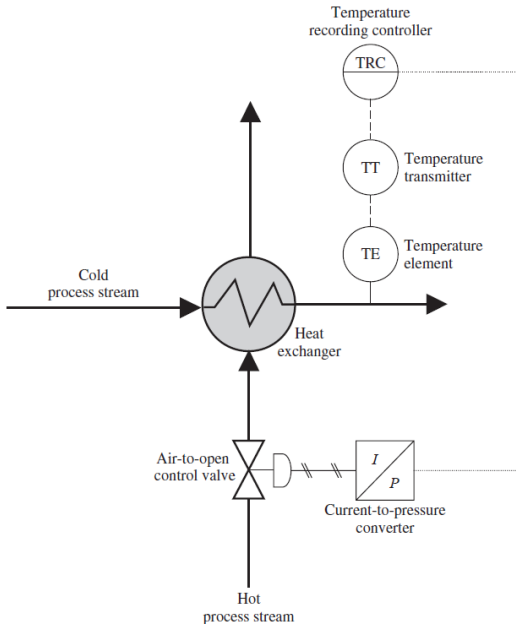
Diagramas de blocos do reator químico



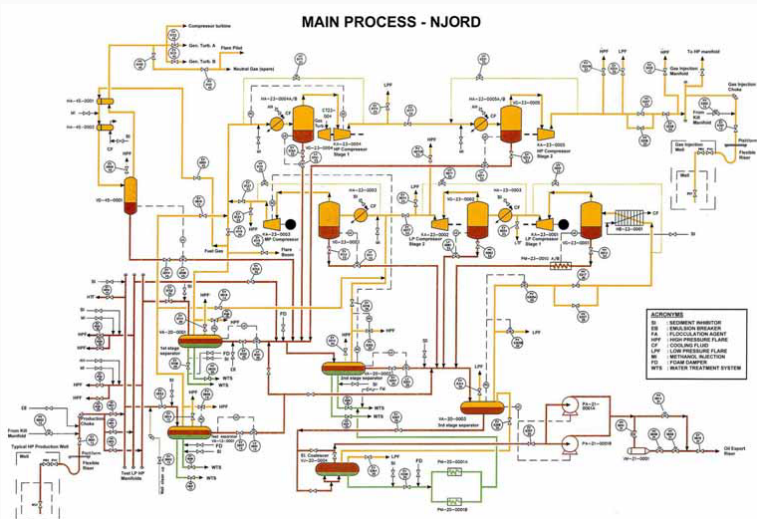
Exemplo: Controle de temperatura



P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)



Exemplo: P&ID de uma planta de extração de óleo e gás



Sistemas de controle: malha aberta versus malha fechada

Sistema de controle em malha aberta (Open loop)

- Um sistema de controle em malha aberta utiliza um dispositivo atuador para controlar o processo diretamente sem a utilização de **realimentação negativa** (*negative feedback*).
- Dessa forma, o sistema de controle não sabe qual o valor do sinal de saída $y(t)$ (variável controlada).

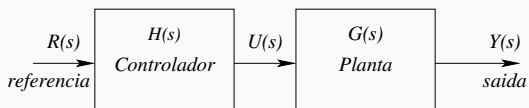


Figura 2: Representação de um sistema de controle em malha aberta.

- Controle do sistema de marcha lenta de um automóvel (**Pré-Injeção Eletrônica**)
 - Mudanças na carga aplicada (Ex: Ar-condicionado é ligado) podem provocar mudanças na velocidade do motor de combustão.
 - As variáveis de entrada do sistema são o ângulo de abertura da válvula de combustível α e o torque aplicado T_L e a saída do sistema é a velocidade do motor ω (Figura 12).

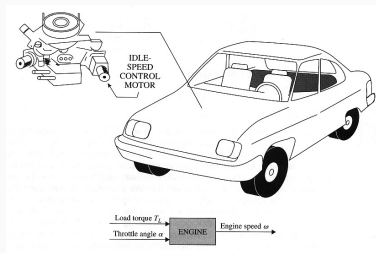


Figura 3: Sistema de controle para a marcha lenta do motor.

- Máquina de lavar roupas:
 - Numa máquina de lavar roupas todos os ciclos do processo (lavar, enxagar, etc.) são controlados através do tempo da duração de cada tarefa.
 - Nenhuma variável é medida para controlar a qualidade do processo.



Sistema de controle em malha fechada

- **Utilização do conceito de realimentação negativa (Negative feedback)**
- Um sistema de controle em malha fechada usa uma medida da saída do sistema $y(t)$ e uma realimentação deste sinal para uma comparação com um sinal de referência $r(t)$.
- O sinal de erro $e(t) = r(t) - y(t)$ é utilizado pelo controlador $H(s)$ para o cálculo do sinal de atuação $e(t)$.
- A Figura 4 ilustra um diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada.

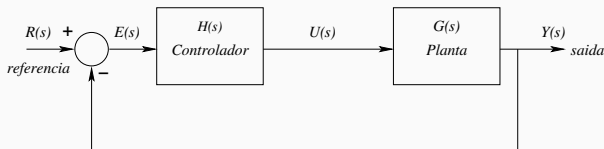
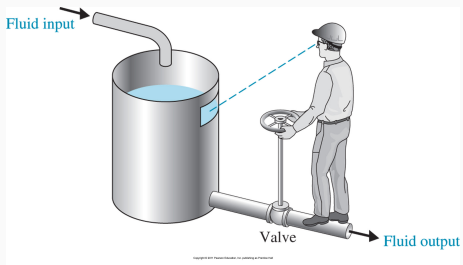


Figura 4: Representação de um sistema de controle em malha fechada.

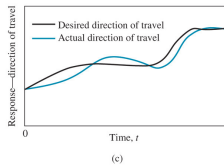
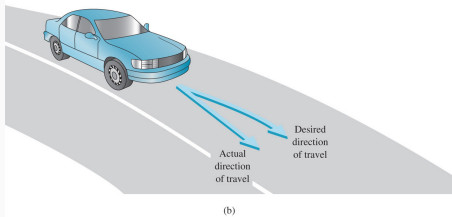
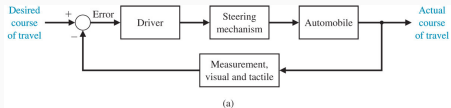
Exemplo: robô industrial - Kuka Titan



Exemplo: Controle manual - sistema simples



Exemplo: controle manual - sistema complexo



Copyright © 2011 Pearson Education, Inc. publishing as Prentice Hall

Sistemas aeronáuticos: mísseis, foguetes, aviões

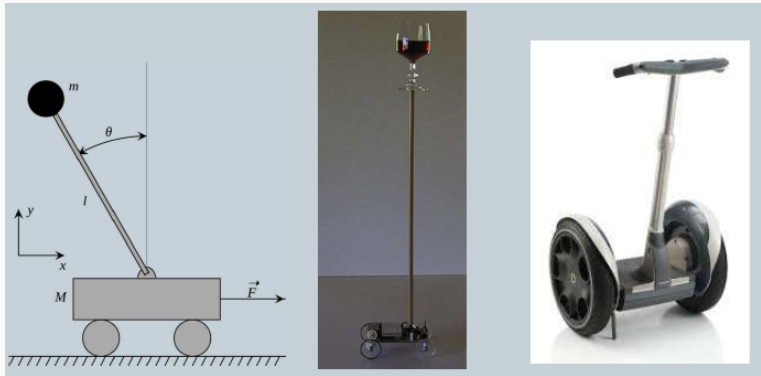


Supermaneuverability

- Super-manobrabilidade.
- Aviões de combate são intencionalmente feito instáveis ou quase instáveis.
- Por exemplo, o avião deve ser capaz de realizar a manobra *Pugachev's Cobra*.



Pêndulo invertido



Um exemplo

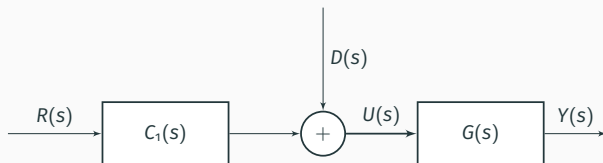
- Vamos supor que um determinado sistema pode ser descrito pela seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{10}{5s + 1}. \quad (2)$$

- Deseja-se projetar um sistema de controle que faça com que o sistema passe a ter um comportamento dinâmico descrito pela seguinte função de transferência:

$$G_D(s) = \frac{2}{s + 2} \quad (3)$$

- A seguir apresenta-se uma solução em malha aberta e outra em malha fechada.
- Dois cenários são apresentados:
 - distúrbio na entrada da planta $d(t)$,
 - variação da planta do sistema.
- Comparações são realizadas sob o ponto de vista do comportamento estático.

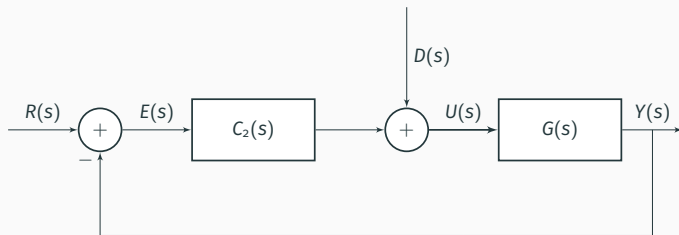


- Um possível controlador $C_1(s)$ para o sistema de controle em malha aberta pode ser realizado como:

$$C_1(s) = \frac{5s + 1}{10}. \quad (4)$$

- Dessa forma:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{5s + 1}{5(s + 2)} \frac{10}{5s + 1} = \frac{2}{s + 2}. \quad (5)$$



- Um possível controlador $C_2(s)$ para o sistema de controle em malha fechada pode ser realizado como:

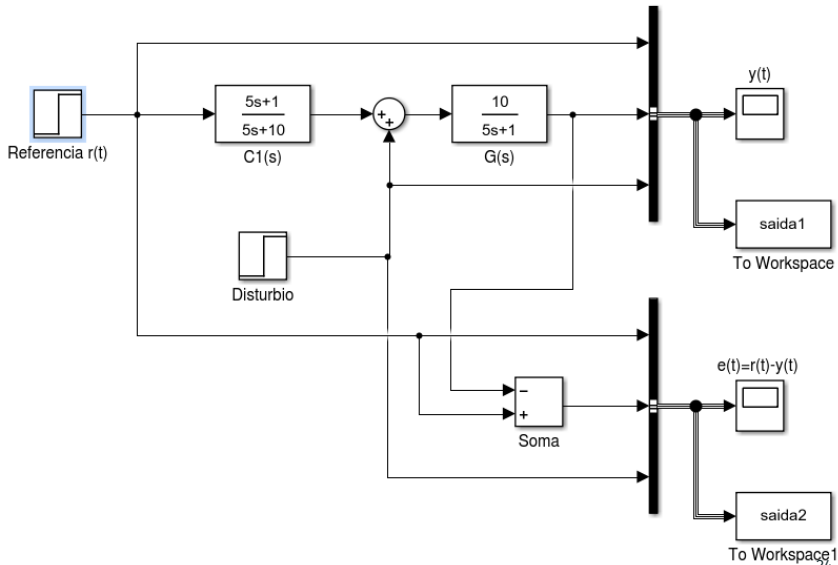
$$C_2(s) = \frac{5s + 1}{5s}. \quad (6)$$

- Dessa forma:

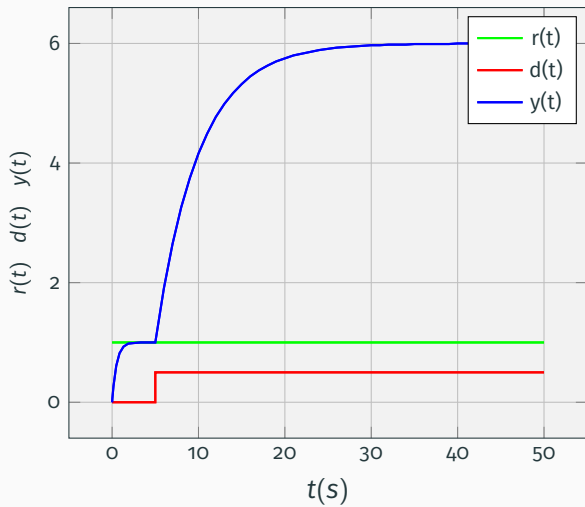
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)C_2(s)}{1 + G(s)C_2(s)} = \frac{2}{s + 2}. \quad (7)$$

- Inicialmente vamos comparar o comportamento da malha aberta e da malha fechada considerando a presença de um sinal de referência $r(t) = 1, t \geq 0$ e de um sinal de distúrbio na entrada da planta $d(t) = 0.5, t \geq 5\text{seg}$

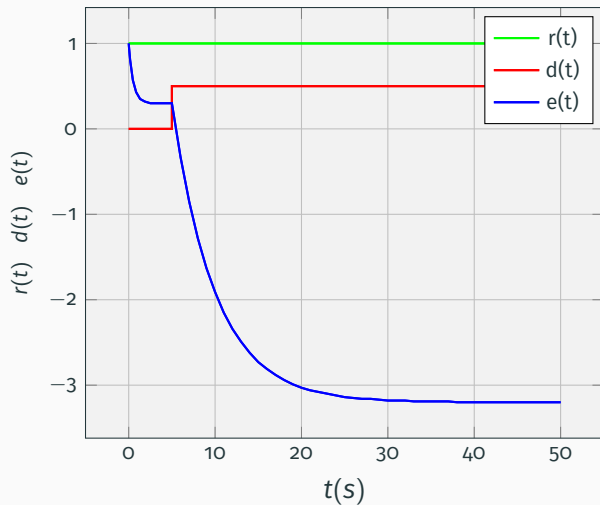
Open loop - modelo simulink - distúrbio na entrada da planta



Open Loop - saída $y(t)$

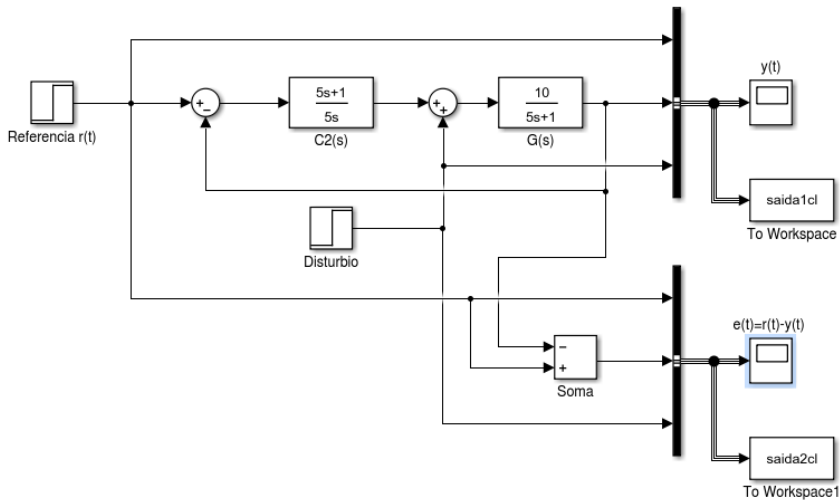


Open Loop - erro $e(t)$

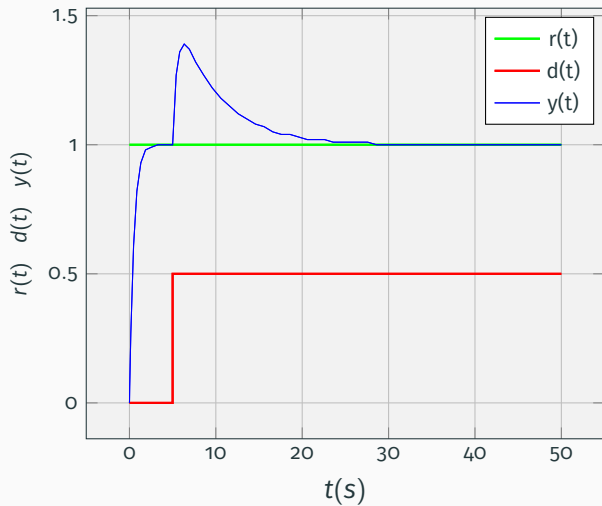


- Excita-se o sistema através de um sinal de referência do tipo degrau unitário $r(t) = 1$.
- O sinal de saída $y(t)$ converge para um valor estacionário $y_{SS} = 1$. Ou seja, $e_{SS} = 0$.
- O aparecimento do sinal de distúrbio $d(t) = 0.5$ na entrada da planta em $t = 5\text{seg}$ provoca uma mudança no valor do sinal de saída para o valor de regime estacionário $y_{SS} = 6$.
- **Não é possível compensar o efeito do sinal de distúrbio $d(t)$.**

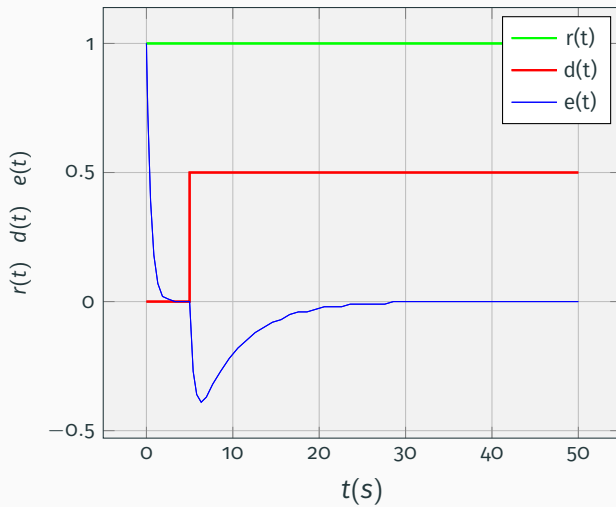
Closed loop - modelo simulink - distúrbio na entrada da planta



Closed Loop - saída $y(t)$



Closed Loop - erro $e(t)$



- Excita-se o sistema através de um sinal de referência do tipo degrau unitário $r(t) = 1$.
- O sinal de saída $y(t)$ converge para um valor estacionário $y_{SS} = 1$ que equivale ao valor do sinal de referência $r(t) = 1$. Ou seja, $e_{SS} = 0$.
- O aparecimento do sinal de distúrbio $d(t) = 0.5$ na entrada da planta em $t = 5\text{seg}$ provoca uma oscilação na saída $y(t)$ mas em seguida converge novamente para $y_{SS} = 1$.
- **É possível compensar o efeito do sinal de distúrbio $d(t)$ utilizando um sistema de controle em malha fechada.**

Malha aberta × Malha fechada - efeitos da variação da planta

- Vamos supor que houve uma variação de parâmetro na planta $G(s)$.
- A nova função de transferência é representada por:

$$\bar{G}(s) = \frac{7}{5s + 1}. \quad (8)$$

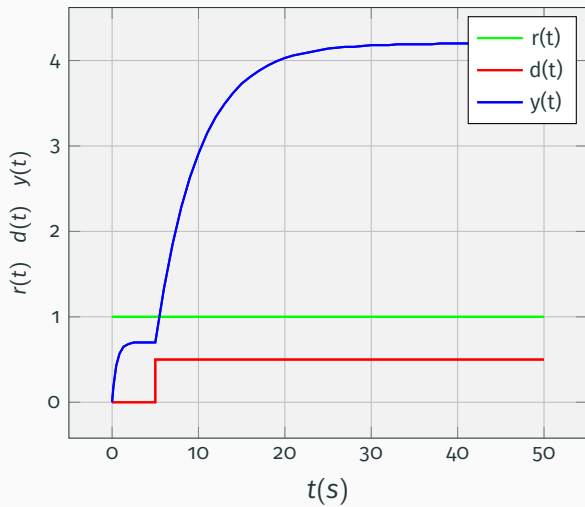
- A função de transferência do sistema de controle em malha aberta pode ser escrito como:

$$\bar{G}_{OL} = C_1(s)\bar{G}(s) = \frac{5s + 1}{5(s + 2)} \frac{7}{5s + 1} = \frac{1.4}{s + 2}. \quad (9)$$

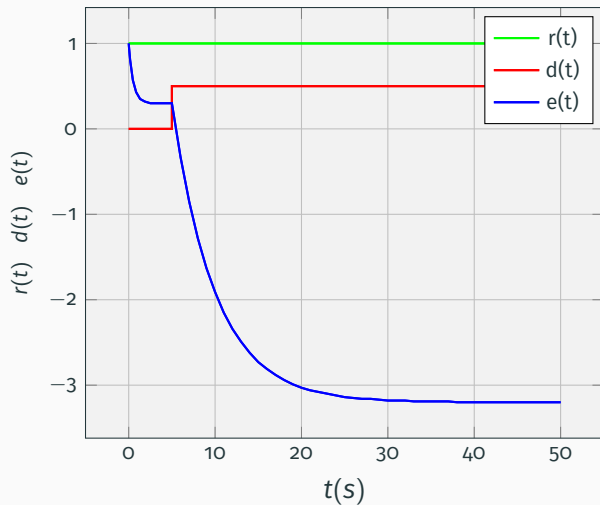
- A função de transferência do sistema de controle em malha fechada pode ser escrito como:

$$\bar{G}_{CL} = \frac{C_2(s)\bar{G}(s)}{1 + C_2(s)\bar{G}(s)} = \frac{35s + 1}{25s^2 + 40s + 7} \quad (10)$$

Open loop - saída $y(t)$

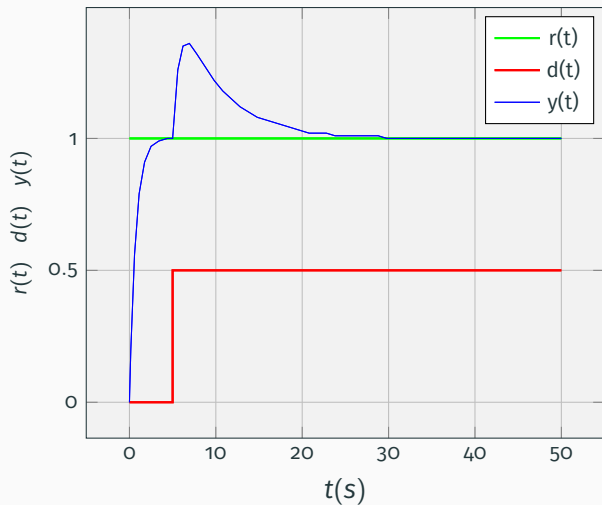


Open loop - erro $e(t)$

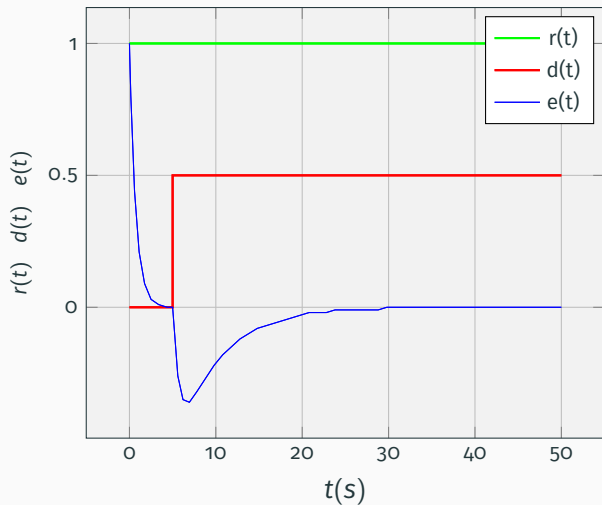


- Excita-se o sistema através de um sinal de referência do tipo degrau unitário $r(t) = 1$.
- O sinal de saída $y(t)$ não converge para o valor estacionário $y_{SS} = 1$.
- O aparecimento do sinal de distúrbio $d(t) = 0.5$ na entrada da planta em $t = 5\text{seg}$ provoca uma mudança no valor do sinal de saída para o valor de regime estacionário $y_{SS} = 4.20$.
- **Não é possível compensar o efeito da variação da planta.**

Closed loop - saída $y(t)$



Closed loop - erro $e(t)$



- Excita-se o sistema através de um sinal de referência do tipo degrau unitário $r(t) = 1$.
- O sinal de saída $y(t)$ converge para um valor estacionário $y_{SS} = 1$ que equivale ao valor do sinal de referência $r(t) = 1$. Ou seja, $e_{SS} = 0$.
- O aparecimento do sinal de distúrbio $d(t) = 0.5$ na entrada da planta em $t = 5\text{seg}$ provoca uma oscilação na saída $y(t)$ mas em seguida converge novamente para $y_{SS} = 1$.
- A variação do ganho da planta provoca uma mudança na resposta transitória do sistema mas o sistema de controle preserva o comportamento estático.
- **É possível compensar o efeito de variação da planta utilizando um sistema de controle em malha fechada.**

Uma análise do conceito de malha fechada

- Descrição de sistemas:
 - equações diferenciais \Leftrightarrow domínio do tempo;
 - funções de transferência \Leftrightarrow domínio da frequência.
- Uma função de transferência $G_1(s)$ de um sistema pode ser escrita genericamente como:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) = \frac{b_0^o s^{m_1} + b_1^o s^{m_1-1} + \dots + b_{m_1}^o}{s^{n_1} + a_1^o s^{n_1-1} + \dots + a_{n_1}^o}, \quad n_1 > m_1. \quad (11)$$

- Onde $b_k^o, k = 0, \dots, m_1$ são os coeficientes do polinômio do numerador e $a_i^o, i = 1, \dots, n_1$ são os coeficientes do denominador,
- e o índice 'o' é utilizado para indicar uma configuração de malha aberta (*open loop*).

- Obviamente, a função de transferência pode ser decomposta numa representação explícita de pólos e zeros:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) = \frac{(s - z_0^o)(s - z_1^o) \dots (s - z_{m_1-1}^o)}{(s - p_0^o)(s - p_1^o) \dots (s - p_{n_1-1}^o)}. \quad (12)$$

- Onde $z_k^o, k = 0, 1, \dots, m_1 - 1$ são os zeros do sistema e $p_i^o, i = 0, 1, \dots, n_1 - 1$ são os pólos do sistema.

A Figura ilustra o diagrama de blocos do sistema em malha aberta e em malha fechada após a introdução do controlador $H(s)$.

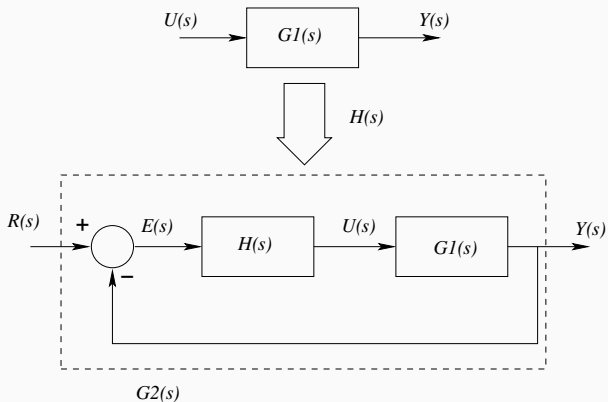


Figura 5: Introdução do controlador $H(s)$ em malha fechada.

- A introdução do controlador $H(s)$ no caminho direto, muda o comportamento do sistema.
- A função de transferência em malha fechada pode agora ser escrita como:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G_2(s) = \frac{G_1(s)H(s)}{1 + G_1(s)H(s)} = \frac{b_0^c s^{m_2} + b_1^c s^{m_2-1} + \dots + b_{m_2}^c}{s^{n_2} + a_1^c s^{n_2-1} + \dots + a_{n_2}^c}, \quad (13)$$

$$= \frac{(s - z_0^c)(s - z_1^c) \dots (s - z_{m_2-1}^c)}{(s - p_0^c)(s - p_1^c) \dots (s - p_{n_2-1}^c)}, \quad n_2 > m_2. \quad (14)$$

- Onde o índice 'c' é utilizado para indicar a configuração de malha fechada (closed loop).

Exemplo: Sistema de 2a. ordem

- Seja o seguinte sistema de 2a. ordem:

-

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s(s+4)}. \quad (15)$$

- Resposta do sistema a degrau unitário:

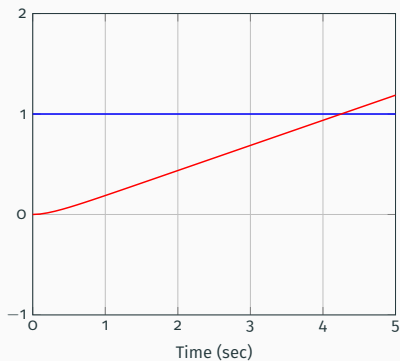
$$Y(s) = \frac{1}{s(s+4)} \cdot \frac{1}{s} \quad (16)$$

- Expansão em frações parciais:

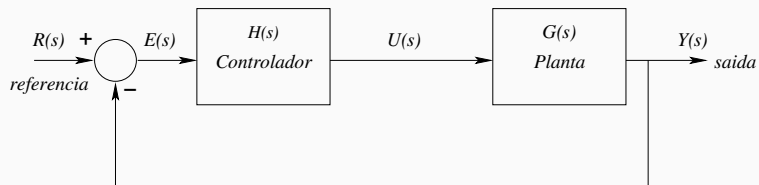
$$Y(s) = \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{s+4} - \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (17)$$

- Solução no domínio do tempo:

$$y(t) = \frac{1}{16} \exp(-4t) + \frac{1}{4}t - \frac{1}{16} \quad (18)$$



- Considera-se agora um sistema de controle em malha fechada



-

$$G(s) = \frac{1}{s(s+4)} \quad (19)$$

$$H(s) = K_p \quad (20)$$

-

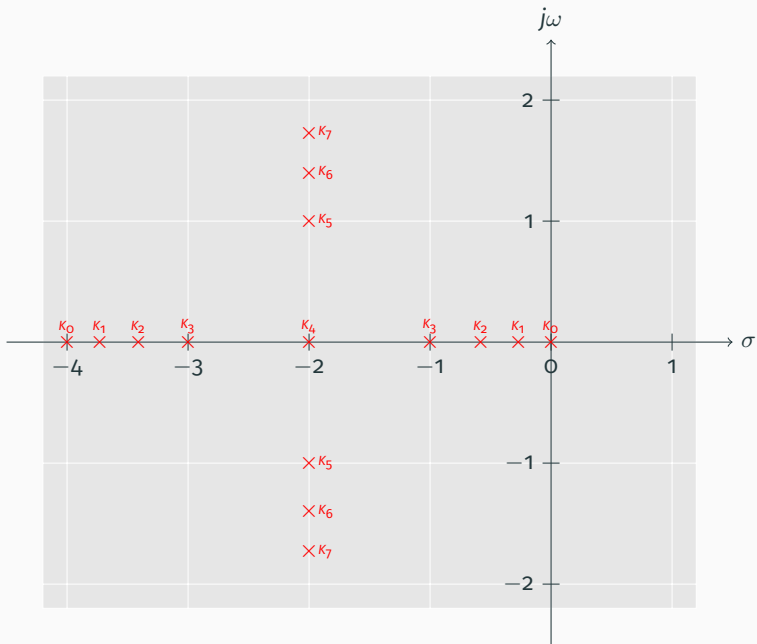
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{K_p}{s^2 + 4s + K_p} \quad (21)$$

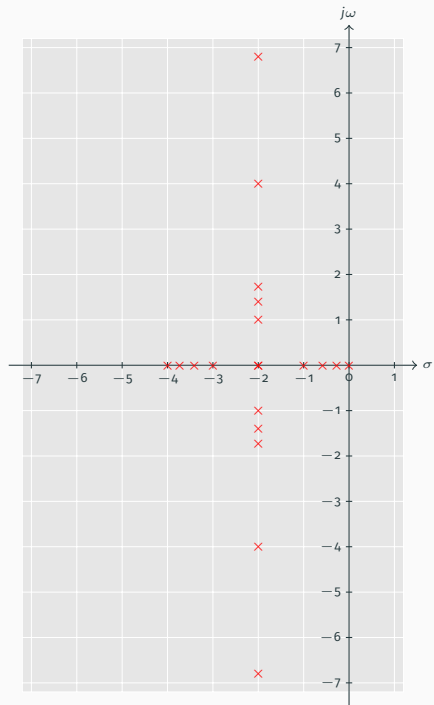
- Equação característica depende de K_p :

$$1 + G(s)H(s) = s^2 + 4s + K_p \quad (22)$$

Varição do sistema de malha fechada em função de K_p

K_p	p_1	p_2	$\frac{G(s)H(s)}{1+G(s)H(s)}$
0	0.00	-4.00	
1.0	-0.27	-3.73	$\frac{1.0}{s^2+4s+1}$
2.0	-3.41	-0.58	$\frac{2}{s^2+4s+2}$
3.0	-1.00	-3.00	$\frac{3}{s^2+4s+3}$
4.0	-2.00	-2.00	$\frac{4}{s^2+4s+4}$
5.0	-2.00+j1.00	-2.00-j1.00	$\frac{5}{s^2+4s+5}$
6.0	-2.00+j1.40	-2.00-j1.40	$\frac{6}{s^2+4s+6}$
7.0	-2.00+j1.73	-2.00-j1.73	$\frac{7}{s^2+4s+7}$
20.0	-2.00+j4.00	-2.00-j4.00	$\frac{20}{s^2+4s+20}$
50.0	-2.00+j6.78	-2.00-j6.78	$\frac{50}{s^2+4s+50}$



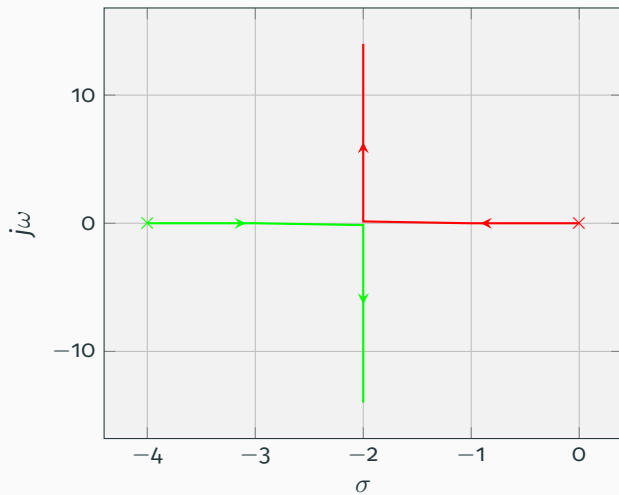


- A equação característica depende de K_p :

$$1 + G(s)H = s^2 + 4s + K_p \quad (23)$$

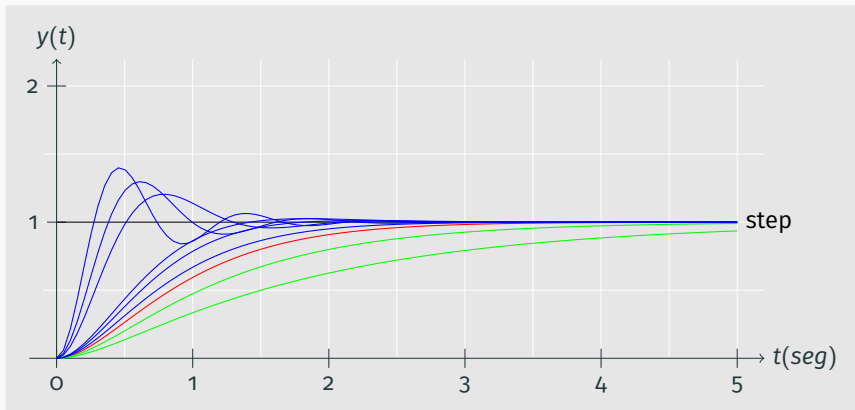
- Cada valor de K_p define um sistema diferente com pares de pólos específicos (p_1, p_2) .
- O lugar geométrico de todos os pólos (p_1, p_2) obtidos com o valor de $0 \leq K_p \leq \infty$ compõem um lugar geométrico denominado lugar das raízes.

Lugar das raízes



Resposta no domínio do tempo para diferentes valores de K_p

- Sistema se torna mais rápido e mais oscilatório com o aumento do valor de K_p .



Sistemas de controle: requisitos de desempenho

- A idéia fundamental do projeto de sistemas de controle é alterar as características do sistema no domínio do tempo (e conseqüentemente no domínio da freqüência) através da introdução do controlador dado por $H(s)$.
- A interação entre $H(s)$ e $G(s)$ em malha fechada permite realocar os pólos e zeros do sistema de tal forma a tentar satisfazer os requisitos desejados.

Requisitos de desempenho

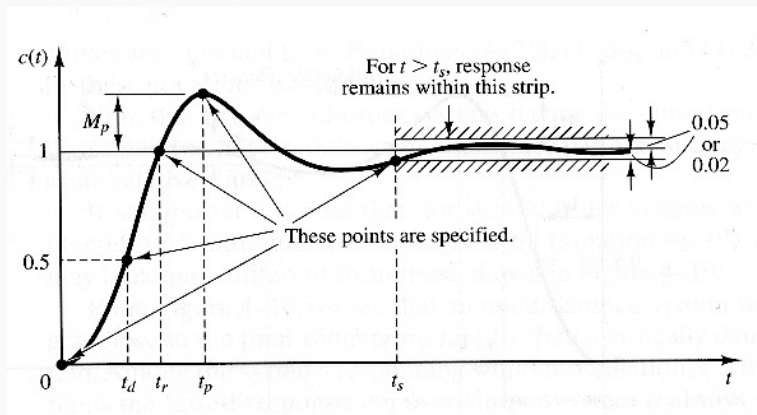


Figura 6: Resposta a degrau de um sistema evidenciando suas características no domínio do tempo.

Usualmente, os objetivos de desempenho são representados através de suas características no domínio do tempo:

- Erro estático (e_{ss}): $e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$ para uma entrada padronizada (degrau, rampa, etc.).
- Tempo de subida (t_r): tempo que a saída do sistema $y(t)$ demora entre 0 e 100% do valor final $y(\infty)$.
- Tempo de assentamento (t_s): O tempo de assentamento t_s é definido como o instante de tempo tal que o sinal de erro $e(t)$ passa a ser menor que um determinado valor percentual, em geral, definido como 2% ou 5%.

- Máximo sobressinal (M_p): O máximo sobressinal é o maior erro percentual em relação ao valor final $y(\infty)$. O maior valor de $y(t)$ é denominado $y(t_p)$ onde t_p é o instante de ocorrência do valor de pico. O máximo sobressinal é definido da seguinte forma:

$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%,$$

- Em princípio poderíamos imaginar que seja possível através da introdução de $H(s)$ alterar os pólos e zeros para qualquer número e valor que desejarmos.
- Entretanto, várias limitações teóricas e físicas não permitem tal flexibilidade.

- Muitos fatores podem contribuir para não ser possível se alcançar os objetivos de desempenho:
 - A complexidade do controlador se refere a topologia da estrutura de controle e ao grau dos polinômios utilizados para implementar o controlador.
 - A utilização de estruturas de controle com complexidade polinomial pré-definida pode ser uma restrição para se atingir os objetivos de desempenho.
 - Além disso, é sabido que a estrutura de controle linear mais geral possível é representada pelo controlador de dois graus de liberdade apresentado na Figura.
 - Entretanto, usualmente se utiliza o controlador de 1 grau de liberdade por ser de projeto mais simples.

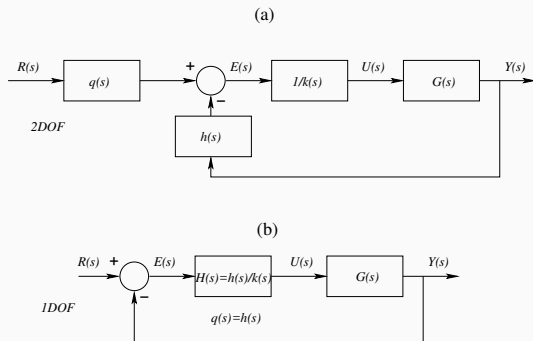


Figura 7: (a) Controlador de dois graus de liberdade (2DOF) - (b) controlador de 1 grau de liberdade (1DOF).

- Os atuadores (por exemplo: válvulas pneumáticas, válvulas hidráulicas, amplificadores, motores elétricos, etc.) possuem sempre algum comportamento não linear,
- Exemplo: saturação, histerese, atrito, etc.

- Usualmente, sistemas de controle sofrem a ação de distúrbios, tais como atrito e folgas por exemplo.
- Tais distúrbios podem ser representados como sinais de entrada no sistema que afetam diretamente a planta a ser controlada.

- Os modelos de planta utilizados para o projeto de sistemas de controle são apenas aproximações da planta real.
- Erros de modelagem estão sempre presentes.
- Os modelos utilizados são em geral os mais simples possíveis, optando-se com freqüência por modelos lineares invariantes no tempo representados por funções de transferência com polinômios de baixa ordem.
- Despreza-se comportamentos não lineares e parâmetros variantes no tempo quando estes não são significativos.

- Processos de medida utilizando sensores usualmente geram ruídos de alta frequência no sistema.

O problema de controle redefinido

- A estabilidade e os objetivos de desempenho devem ser mantidos mesmo sob condições adversas.
- Para tal, uma análise no domínio da frequência através do ganho em malha aberta $G(s)H(s)$ deve ser realizada.

Uma análise mais detalhada

Uma representação mais realista de um sistema de controle seria a apresentada através do diagrama de blocos da Figura abaixo:

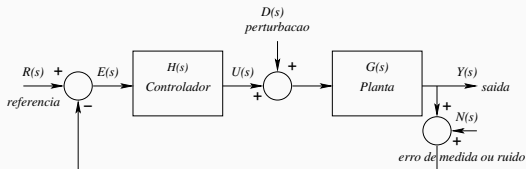


Figura 8: Sistema de controle em malha fechada.

Onde:

- $R(s)$ - sinal de referência,
- $E(s)$ - sinal de erro,
- $U(s)$ - sinal de controle,
- $D(s)$ - sinal de distúrbio,
- $Y(s)$ - sinal de saída,
- $N(s)$ - sinal de erro (ruído) de medida.

- A utilização de um sistema de controle em malha fechada não apenas reduz o erro do sistema mas também provoca mudanças importantes em outras propriedades como:
 - ganho do sistema,
 - estabilidade,
 - sensibilidade a variações da planta,
 - sensibilidade a distúrbios externos
 - sensibilidade a ruídos de medida, etc.

- Para o sistema de controle acima, a função de transferência agora com três entradas pode ser escrito como:

$$Y(s) = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}R(s) + \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}D(s) - \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}N(s). \quad (24)$$

- Note que agora temos três funções de transferência distintas correspondentes a cada uma das entradas.

- Vamos examinar agora como um sistema de controle em malha fechada pode influenciar algumas das propriedades que são consideradas importantes para o projeto de sistemas de controle.

- O sistema de controle em malha fechada afeta o ganho do sistema $G(s)$ ¹ de um fator dado por:

$$\frac{H(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (25)$$

¹muitas vezes a função de transferência $G(s)$ é denominada de ganho do sistema, já que em regime permanente senoidal para cada frequência ω o sistema assume um ganho distinto.

- Um sistema pode passar de estável a instável e vice-versa.
- Através da análise de $G(s)H(s)$ é possível analisar a margem de estabilidade do sistema ,ou seja, a distância que o sistema se encontra do limiar da instabilidade.

- Considerando apenas a contribuição de $R(s)$ para o sinal de erro $E(s)$ temos:

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} R(s). \quad (26)$$

- Desta forma, se for desejado que o erro $E(s) \cong 0$ é necessário fazer com que $|G(s)H(s)| \gg 1$

- Um sistema de controle adequado requer que o mesmo seja insensível a variações da planta **ao mesmo tempo** que seja sensível ao sinal de referência $R(s)$.
- Inicialmente, verifiquemos o efeito da variação de $G(s)$ sobre a saída $Y(s)$. Vamos considerar que a variação de $G(s)$ seja representada por $\Delta G(s)$

- Aqui $\Delta G(s)$ pode ser entendido como um termo aditivo que representa a incerteza no modelo da planta.
- Ou seja, a planta real está no intervalo entre $G(s)$ e $G(s) + \Delta G(s)$.
- Neste caso, poderíamos representar a planta do sistema como ilustrado na Figura.

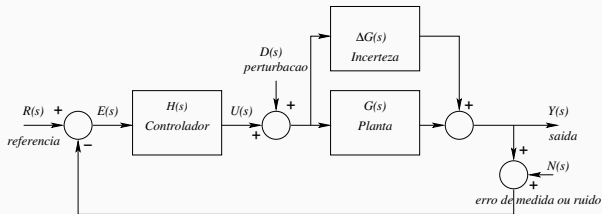


Figura 9: Representação do sistema de controle considerando a incerteza $\Delta G(s)$.

- A função de malha fechada, neste caso, pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} Y(s) + \Delta Y(s) &= \frac{(G(s) + \Delta G(s))H(s)}{1 + (G(s) + \Delta G(s))H(s)} R(s) & (27) \\ &= \frac{G(s)H(s)}{1 + (G(s) + \Delta G(s))H(s)} R(s) \\ &\quad + \frac{\Delta G(s)H(s)}{1 + (G(s) + \Delta G(s))H(s)} R(s). \end{aligned}$$

- Utilizando a equação correspondente a malha fechada com o valor nominal de $G(s)$:

$$Y(s) = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s), \quad (28)$$

- Obtemos:

$$\Delta Y = \frac{\Delta G(s)H(s)}{(1 + G(s)H(s) + \Delta G(s)H(s))(1 + G(s)H(s))} R(s). \quad (29)$$

- Como em geral, $G(s)H(s) \gg \Delta G(s)H(s)$ então:

$$\Delta Y(s) = \frac{\Delta G(s)H(s)}{(1 + G(s)H(s))^2} R(s). \quad (30)$$

- Dividindo a Equação 30 pela Equação 28 obtemos:

$$\frac{\Delta Y(s)}{Y(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \frac{\Delta G(s)}{G(s)}. \quad (31)$$

- Ou seja, a variação relativa do sinal de saída $\Delta Y(s)/Y(s)$ devido a variação relativa da planta $\Delta G(s)/G(s)$ é diminuída pelo fator $1 + G(s)H(s)$. Desta forma, se fizermos $|G(s)H(s)| \gg 1$, podemos diminuir o efeito da variação relativa da planta sobre a saída do sistema.

- A parcela de contribuição do sinal de distúrbio na entrada da planta pode ser escrita como:

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}D(s), \quad (32)$$

- Admitindo que, $|G(s)H(s)| \gg 1$, então podemos escrever:

$$Y(s) = \frac{1}{H(s)}D(s). \quad (33)$$

- Para que a contribuição de $D(s)$ para $Y(s)$ seja reduzida o ganho de $H(s)$ deve ser grande para valores de s onde $D(s)$ possui valores significativos.

- A parcela de contribuição do ruído $N(s)$ pode ser escrita como:

$$Y(s) = -\frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}N(s). \quad (34)$$

- Admitindo que $|G(s)H(s)| \ll 1$ então $|1 + G(s)H(s)| \cong 1$ e neste caso $Y(s) \cong 0$. Ou seja, o ganho de malha $G(s)H(s)$ deve ser pequeno para os valores de s onde o erro de medida é grande.

Conclusões fundamentais

- o ganho da malha direta $G(s)H(s)$ é a principal grandeza a ser analisada para a análise de desempenho do sistema em malha fechada.
- os requisitos de acompanhamento do sinal de referência, rejeição de perturbações e insensibilidade a variações da planta exigem que $G(s)H(s)$ seja **grande**;
- o requisito de rejeição do erro de medida requer que $G(s)H(s)$ seja **pequeno**.

- sinais de referência, as perturbações e as variações da planta se referem a regiões de baixa frequência (*s pequeno*);
- enquanto que os ruídos de medida se referem a regiões de alta frequência (*s grande*).
- O controlador ideal é aquele onde o ganho de malha aberta $G(s)H(s)$ é projetado como ilustrado na Figura abaixo. O projeto de sistemas de controle consiste em definir a *forma* de $G(s)H(s)$ o que só pode ser através da escolha do controlador $H(s)$.

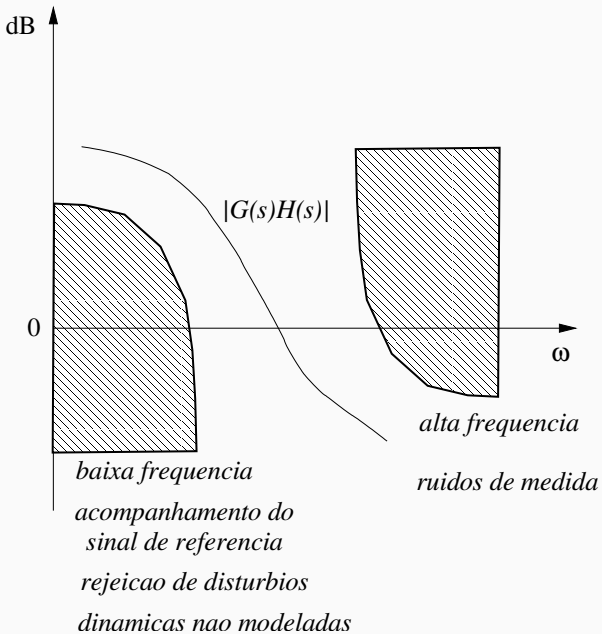


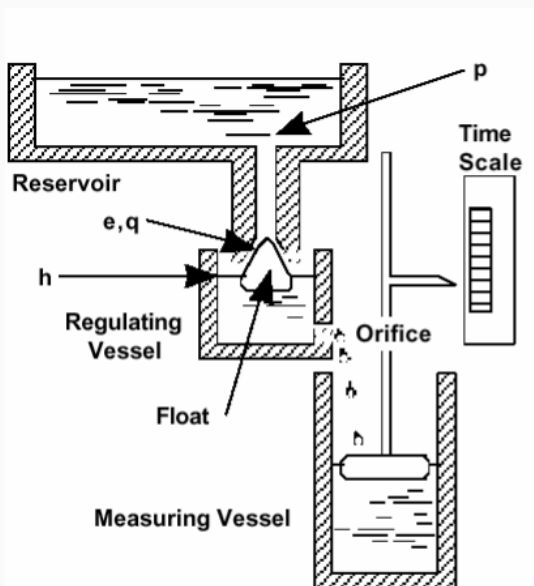
Figura 10: Projeto do ganho de malha aberta $G(s)H(s)$ para desempenho robusto.

Fatos históricos, Exemplos

- (300-1AC) Primeiras aplicações de controle na Grécia:
 - Ktesibios desenvolve um relógio d'água que utiliza um regulador flutuante.
 - (250AC) Philon desenvolve uma lamparina a óleo que utiliza um regulador flutuante para manter o nível de óleo constante.
 - (1DC) Heron de Alexandria publica um livro denominado Pneumatica que contém várias formas de utilização de reguladores flutuantes para controlar o nível d'água.
- (1769) O sistema de controle de velocidade para uma máquina a vapor desenvolvido por James Watt é considerada a primeira aplicação industrial
- (1868) J.C. Maxwell formula um modelo para o regulador de velocidade da máquina a vapor.

- (1911) Primeiro PID desenvolvido pela Sperry.
- (1927) H.W. Black analisa amplificadores realimentados.
- (1932) H. Nyquist desenvolve um método para analisar a estabilidade de sistemas.
- (1933) PID pneumático desenvolvido pela Taylor Instruments.
- (1950) Primeiro controlador PID de Estado Sólido desenvolvido pela Foxboro.
- (1952) Máquinas CNC desenvolvidas no MIT.
- (1954) George Devol desenvolve o primeiro robô industrial.
- (1970) Modelos de variáveis de estado e controle ótimo são desenvolvidos.
- (1980) Controle robusto é desenvolvido.

Relógio de água



31

محمد بن نصر الانبوي سمعنا فاما ونحن الما فليلا ما ذاك ان
 اللسان الذي على خط اليد من مثل ما انما يخرج كونه وورد
 الفأر 13 ساعة متوا اذا ان في السطان فاذا ان الشمس
 الحمل والميزان ملائمة المرى يومه والسنة واذا ان الشمس الابد
 تضع المرى الصار على خطه واللسان على خطه واذا ان اشجج
 كانت في الفأر عليه والليل على خطه فانه يورد 13 ساعة
 الدهر كله ولا يخرج الا الصغار سنة الام ولكن الدولاب في
 محور البكرة
 البكرة
 ولابد
 لسنتي
 ثم سائر
 مخزنه عن
 مد منه
 الاعمال
 وهذه
 صورة كل
 ملبس
 الازن والاب
 الكثرة
 وهذا
 البناء الذي يخرج من سفار العراب وذلك انما قيل في انضيف
 من محور البكرة داره كما جعل الحجاب يدور معه فهو الشهاب واسطرون

وسط الخزانة لثمنها

الدب

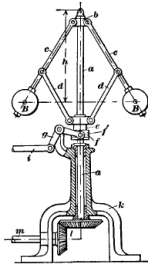
خزانة الزيت

العوامه

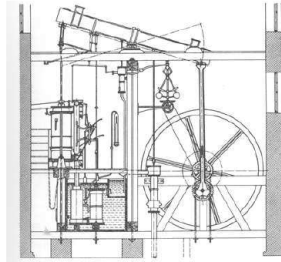
الربيع

خزانة المعيش

نصف الدب



(a)



(b)

Figure 1.2: The centrifugal governor (a), developed in the 1780s, was an enabler of the successful Watt steam engine (b), which fueled the industrial revolution. Figures courtesy Richard Adamek (copyright 1999) and Cambridge University.



On governors,
Proceedings of the Royal Society,
vol. 16, 1868, pages 270–283,
James Clerk Maxwell
(1831-1879)



- O Primeiro PID

1911: Elmer Sperry: First PID controller – used to automate a ships steering mechanism. Elmer was the father of Laurence Sperry (1893-1924), who, in 1914, demonstrated the use of a gyroscope and ailerons to allow an aircraft to maintain level position under disturbances:

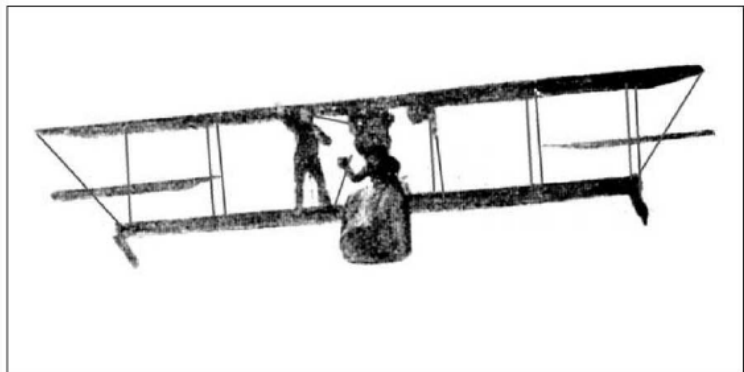


Figure 9. *In the first public demonstration of gyroscopic stabilization, Lawrence Sperry, son of engineer Elmer Sperry, removes his hands from the controls while his mechanic, Emile Chardin, walks onto the lower wing. This demonstration occurred near Paris during a 1914 competition on innovative aircraft safety features [Hughes, 1971].*

Amplificador de sinais com realimentação negativa, Bell Labs

Harold L. Black's Classic Paper "Stabilized Feed-Back Amplifiers" appeared five years after he invented the feedback amplifier and four years before the patent was finally issued. Black's paper shows the advantages of negative feedback in reducing harmonic distortion, increasing the bandwidth, and maintaining robust performance using primitive vacuum tubes. It also introduces a nomogram similar to the well-known Nichols Chart. In an effort to gain a better understanding of the underlying mechanism of feedback, he enlisted the aid of H. Nyquist who responded with his famous paper, "Regeneration Theory."

Keywords—Feedback, feedback amplifiers, history.



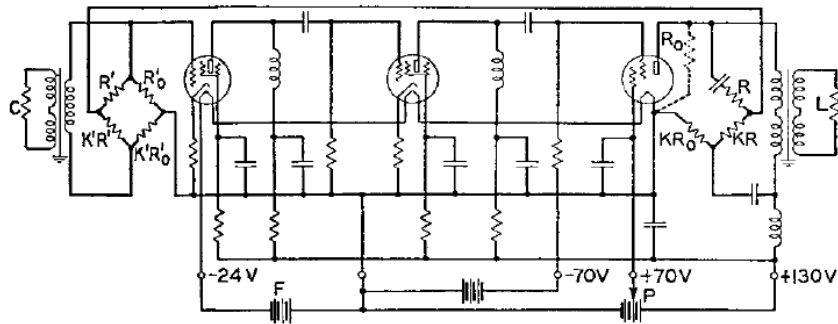
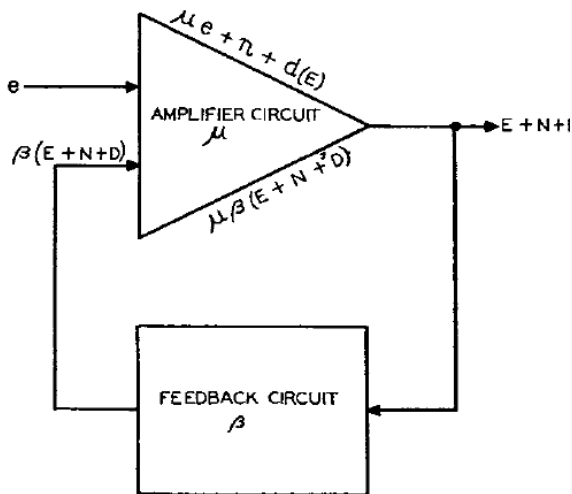
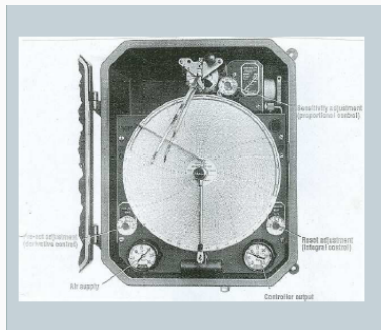


Fig. 2. Circuit of a negative feed-back amplifier.

Diagrama esquemático simplificado



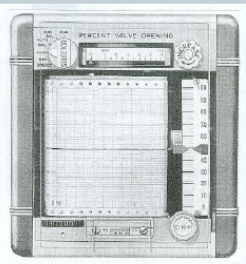
Primeiro PID pneumático, Taylor Instruments, 1933



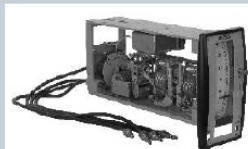
PID controllers

1939: Taylor Instruments *Fatscope 100* [continuously variable P, I, D settings]; the first pneumatic controller with full PID control capabilities in a single unit.

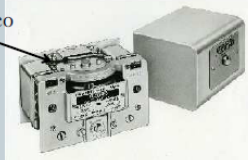
1951: The Swartmont Company introduces their *Antronic* line, the first electronic controllers based on vacuum tube technology.



- Equipamentos:

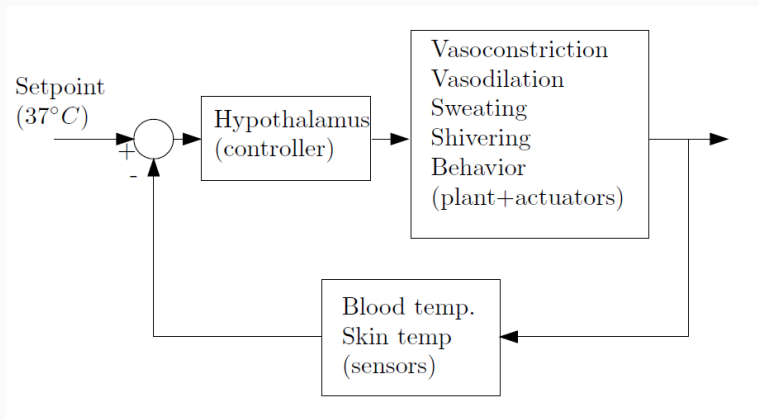


M/58,
Pneumático

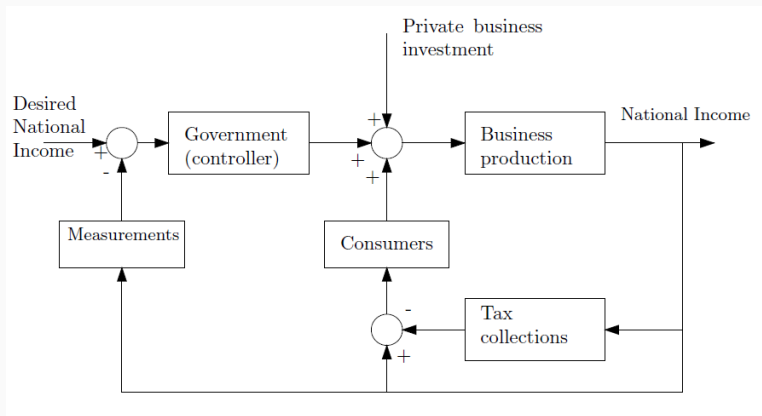


M/62,
Primeiro
totalmente
estado sólido

Controle de temperatura no corpo humano



Modelos econômicos



Acidente - lançador de satélites Ariane 5, 1996

- Primeira missão
- Custo de desenvolvimento durante 10 anos US\$7.0 Bilhões
- Carga: 4 satélites da Agência Espacial Européia (US\$ 370 Milhões)



- Sistema de controle de atitude reaproveitado do Ariane 4,
- Intervalo de acelerações maiores no Ariane 5,
- Conversão de tipo de ponto flutuante (64 bits) para inteiro (16 bits),
- Falha na verificação do software.



Accidente - Gripen JAS 39, 1989



©FAME PICTURES

Figure 1. *Gripen JAS39 prototype accident on 2 February 1989. The pilot received only minor injuries.*

Acidente - Usina Nuclear Chernobyl, 1986



©AP/WIDE WORLD PHOTOS

Figure 2. Chernobyl nuclear power plant shortly after the accident on 26 April 1986.