Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Divisão de Engenharia Eletrônica
Departamento de Sistemas e Controle
São José dos Campos, São Paulo, Brasil

Aula 1 - Introdução ao controle de sistemas

Rubens J M Afonso

EES-10: Sistemas de Controle I

19 de fevereiro de 2018

Motivação

Controle automático de sistemas está presente em diversas aplicações de engenharia, desde o cotidiano até aplicações no estado-da-arte, como:

- Geladeira, condicionador de ar, ferro de passar e forno elétrico;
- Pilotos automáticos de automóveis e Controle Automático de Ganho de rádios automotivos;
- Sistemas de aumentos de estabilidade e de controle de aeronaves, sistema de guiamento de aeronaves;
- Sistemas de controle de atitude de satélites;
- Ventiladores mecânicos.

Motivação

Essa tecnologia permite o uso muito eficiente e seguro de de diversos sistemas relevantes que não funcionariam sem sistema de controle automático. Tomando como exemplo as aeronaves, sua evolução as tornou cada vez mais instáveis, por razões econômicas e de projeto. Assim, a fim de possibilitar o seu manejo pelo piloto, Sistemas de Aumento de Estabilidade (*Stability Augmentation Systems* - SAS) e Sistemas de Aumento de Controle (*Control Augmentation Systems* - CAS) são usados em todas as aeronaves modernas.

Objetivo e enfoque

Objetivo de EES-10

Propiciar as primeiras ferramentas para a **análise** e **síntese** de **sistemas de controle automático**.

Enfoque de EES-10

Sistemas dinâmicos, isto é, aqueles em que as variáveis exibem uma característica de memória. Nosso enfoque será nas ferramentas conhecidas como controle clássico, que englobam para o nosso estudo dois grandes tópicos:

1. Técnicas no domínio da frequência;
2. Técnicas no plano s.

Observação 1.

A síntese de controladores é também chamada de projeto ou "design".

Abordagem: Projeto baseado em modelo (*Model-based design*)

- Técnicas fazem uso intensivo de **modelos matemáticos** dos sistemas a serem controlados e dos próprios sistemas de controle $\rightarrow$ projeto baseado em modelo (*Model-based design*).
- Têm sido amplamente difundidos há décadas e não se restringem à área de engenharia de controle. Alguns dos motivos para isso são:
    - custo crescente dos sistemas que têm sido projetados, inviabilizando a construção de diversos protótipos para testes;
    - significativa complexidade dos sistemas projetados, sendo constituídos de sistemas de sistemas, que devem ser cuidadosamente integrados uns aos outros para que operem conforme esperado;
    - riscos envolvidos (de segurança ou financeiros) em realizar determinados testes;
    - impossibilidade de realizar testes.

Definições preliminares

- **Sistema**: porção delimitada do universo que se pretende estudar, isolada deste para fins de análise. Pode interagir com o universo por meio de **entradas** e **saídas**, vide Fig. 1.

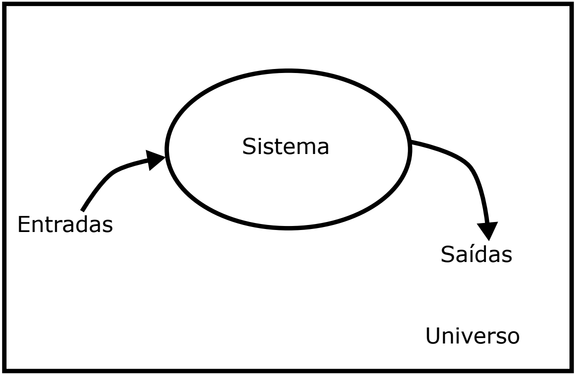


Figura: O sistema interage com o universo por meio de entradas e saídas.

Definições preliminares

- **Entrada**: **sinal** gerado no universo que afeta o sistema de interesse.
- **Saída**: **sinal** gerado no sistema transmitido ao universo.
- **Sinal**: uma função que carrega informação. Na maior parte dos casos de interesse em EES-10 os sinais serão funções do tempo, por exemplo: $x(t) = 5t$, em que x é a posição de um carro ao longo de uma estrada em metros e t é o tempo em segundos.
- **Controle**: alteração da saída de um sistema por meio da manipulação de sua(s) entrada(s). Por exemplo, supondo que o carro seja o sistema, sua posição x dada em metros seja a saída e a aceleração a (m/s^2) seja a entrada, pode-se alterar a saída por meio da entrada.

Definições preliminares

- **Automático**: realizado com pouca ou nenhuma intervenção humana.
- **Modelo**: construto concreto ou abstrato que permite representar, com o requerido grau de fidelidade, algum fenômeno ou sistema de interesse. Por exemplo, uma maquete é um modelo de um prédio, representando com fidelidade as proporções entre as dimensões do prédio.
- **Modelo matemático**: um modelo que permite quantificar relações entre variáveis que descrevam o comportamento do fenômeno ou sistema de interesse. Por exemplo, se o carro parte com velocidade v_0 (m/s) de uma posição x_0 (m), o modelo matemático que relaciona a entrada a à saída x é: $x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{a}{2}t^2$.

Sistema de controle automático: parte delimitada do universo cuja(s) saída(s) se deseja alterar por meio da manipulação da(s) entrada(s), com pouca ou nenhuma intervenção humana.

Neste curso

- Sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output* - SISO);
- Sinais de entrada $u(t)$ e saída $y(t)$ serão sinais reais a tempo t contínuo, i. e., $u(t) : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ e $y(t) : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$.

Observação 2.

Apenas por questão de completude, seja $\Omega \in \mathbb{R}$, sinais $x(t) : \Omega \mapsto \mathbb{Z}$ são ditos quantizados, sinais $x(t) : \mathbb{Z} \mapsto \Omega$ são chamados a tempo discreto. Os sistemas que relacionam esses sinais herdam seus nomes dessas definições, sendo assim, os sistemas de interesse para o presente curso serão sistemas a tempo contínuo com entrada e saída reais.

Formalização matemática do sistema

Para que se possa alterar o comportamento dos sistemas manipulando a entrada, a função de saída necessita ser função da função de entrada, ou seja, a saída deve ser $y(u(t),t)$.

Sistemas como funcionais

Sistemas de interesse mapeiam o sinal de entrada $u(t) : \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}$ ao sinal de saída $y(u) \in \mathbb{R}$, isto é, os sistemas são funcionais, pois estabelecem relações entre o domínio composto de funções reais e a imagem é um subconjunto de $\mathbb{R}$.

Linearidade e invariância no tempo

Invariância no tempo

Caso este mapeamento não seja função explícita do tempo, i. e., $y = y(u(t))$, o sistema é dito ser invariante no tempo.

Linearidade

Caso o mapeamento y obedeça:

$$y(\gamma_1 u_1 + \gamma_2 u_2) = \gamma_1 y(u_1) + \gamma_2 y(u_2),\ \gamma_1, \gamma_2 \in \mathbb{R}, \tag{1}$$

então, o sistema é dito linear.

Os sistemas de interesse para estudo em EES-10 são os sistemas **LIT (lineares e invariantes no tempo)** a tempo contínuo. A menos que explicitado ao contrário, todos os sistemas serão assumidos pertencerem a esta classe ao longo do curso.

Sistema em malha aberta

Um sistema cuja entrada u não seja função explícita da saída y é dito estar em **malha aberta**. Um exemplo de sistema em malha aberta pode ser visto na Fig. 2, em que se omite (como se pretende fazer daqui para frente) o universo.

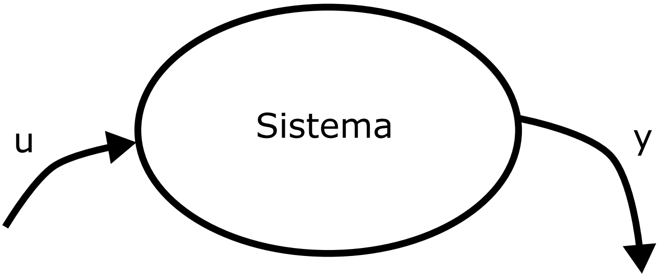
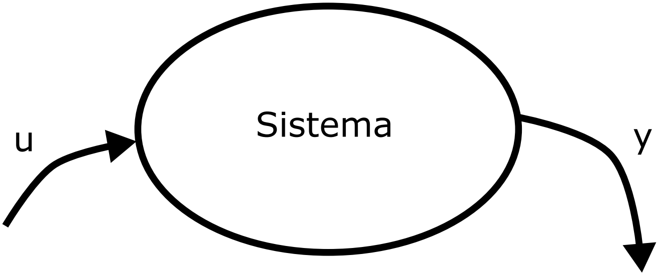


Figura: Um sistema em malha aberta.

Manipulando a saída de um sistema em malha aberta

Example 1.

Suponhamos que esse sistema produza uma saída $y = \int u dt$ para uma entrada u. Se desejarmos que este sistema possua como saída $y(t) = e^{-t}$, podemos escolher $u(t) = r(t) = -e^{-t}$.



Sistema em malha fechada

- Sistema em **malha fechada**: entrada é função explícita da saída, i. e., $u = u(y, \bullet)$;
- Entrada passa a ser um funcional da saída;
- Sistema em malha fechada como sendo a interconexão de dois sistemas, formando um **laço**, em que a saída de um alimenta a entrada do outro e vice-versa;
- Saída **realimentada** para o sistema $\rightarrow$ controle em malha fechada chamado de **realimentação.**

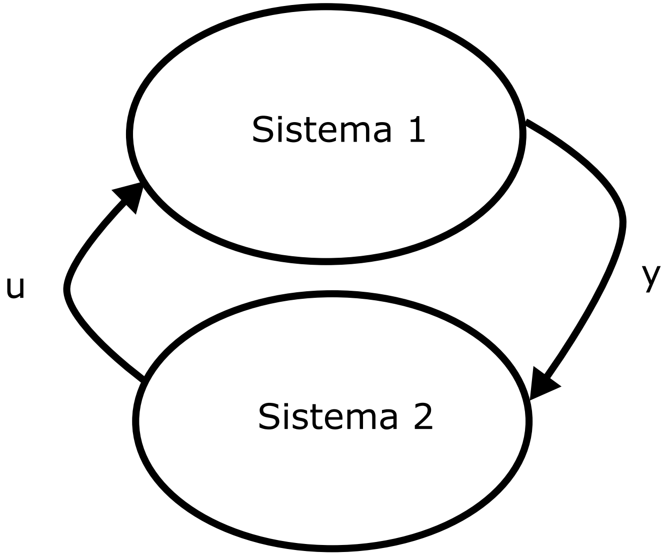


Figura: Um sistema em malha fechada.

Manipulando a saída de um sistema em malha fechada

Example 2.

Supondo a mesma relação entre entrada e saída do exemplo 1 para o sistema 1: $y = \int u dt$, se quisermos agora que o sistema em malha fechada apresente $y(t) = e^{-t}$, podemos escolher $u(t) = -y(t)$. Com isso:

$$y = \int u dt = \int -y dt = -\int y dt, \tag{2}$$

cuja solução é $y(t) = e^{-t}$, conforme desejado.

Observação 3.

Neste caso, o sistema 2, que tem u como saída e y como entrada, se comporta de acordo com $u = -y$.

Uma pergunta pertinente: por que usar malha fechada?

Comparando os resultados das saídas exibidas pelos exemplos 1 e 2, vimos que a mesma saída pode ser atingida por meio da manipulação do sinal de entrada em malha aberta e em malha fechada.

Parece mais complicado obter essa saída em malha fechada, visto ser necessário outro sistema para a realimentação da saída, enquanto em malha aberta basta determinar a função $u(t)$ de forma a satisfazer os requisitos sobre $y(t)$.

Contudo, podemos adiantar que os engenheiros de controle usam predominantemente sistemas em malha fechada, sendo estes o principal elemento do projeto de sistemas de controle. Isso porque há uma vantagem primordial em se utilizar o sistema em malha fechada, que será explicitada em aulas posteriores.

Exercícios

1. Descreva três exemplos de sistemas que você encontra no seu cotidiano, especificando suas entradas e saídas.
2. Seja um resistor de resistência R, submetido a uma tensão u manipulada por meio de uma fonte de tensão, cuja corrente y é medida.
   (a) Descreva o modelo matemático deste sistema.
   (b) Este sistema é:
      i. dinâmico (isto é, possui memória)?
      ii. linear?
      iii. invariante no tempo?
3. Seja um capacitor de capacitância C, submetido a uma tensão u manipulada por meio de uma fonte de tensão, cuja corrente y é medida.
   (a) Descreva o modelo matemático deste sistema.
   (b) Este sistema é:
      i. dinâmico (isto é, possui memória)?
      ii. linear?
      iii. invariante no tempo?

Exercícios

4 Para os exemplos 1 e 2, admita que um erro no sinal u faz com que o sinal verdadeiramente aplicado seja $u' = u + v$, com v constante. Determine:

(a) o sinal de saída para o sistema em malha aberta;

(b) o sinal de saída para o sistema em malha fechada;

(c) qual é a diferença de comportamento em relação ao desejado para os dois sistemas?