



# **INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE CONTROLE**

Profa. Cristiane Paim

# Definições

*“Um **sistema de controle** é uma interconexão de componentes configurados de tal forma que o sistema resultante forneça uma resposta desejada.”*

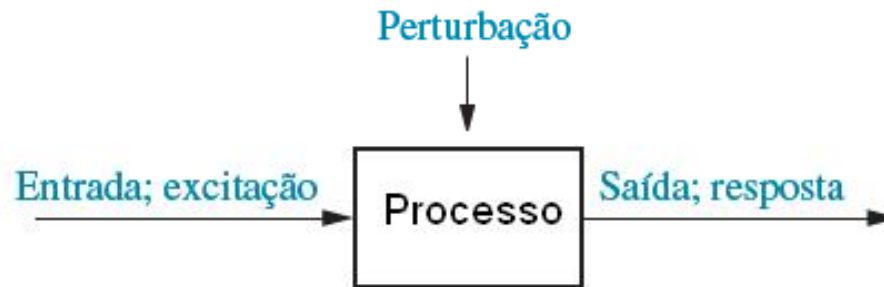
Dorf & Bishop – Sistemas de Controle Moderno

*“Um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre uma saída e uma entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado **Sistema de Controle com Realimentação**.”*

Ogata – Engenharia de Controle Moderno

# Definições

Um sistema de controle pode ser representado esquematicamente por :



**Processo** (ou planta): sistema a ser controlado.

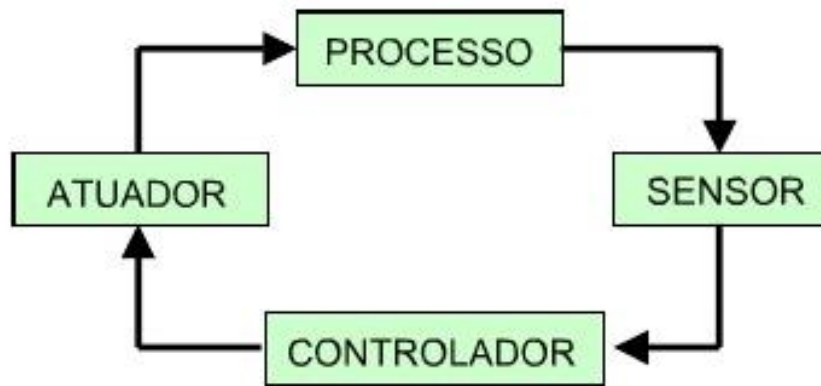
**Excitação** (sinal de controle, variável manipulada): sinal aplicado na entrada do processo.

**Resposta** (variável controlada, variável de processo): é o sinal de saída do processo. É a variável cujo comportamento se deseja controlar.

**Perturbações:** são sinais de entrada, normalmente desconhecidos, cujos valores não podem ser manipulados.

# Objetivo

O objetivo de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada a fim de que o sinal de saída apresente um comportamento pré-especificado, e que o efeito das perturbações sobre este comportamento seja minimizado, ou mesmo completamente eliminado.



# Exemplos

Os sistemas de controle estão presente nas mais diversas áreas.

Alguns exemplos:

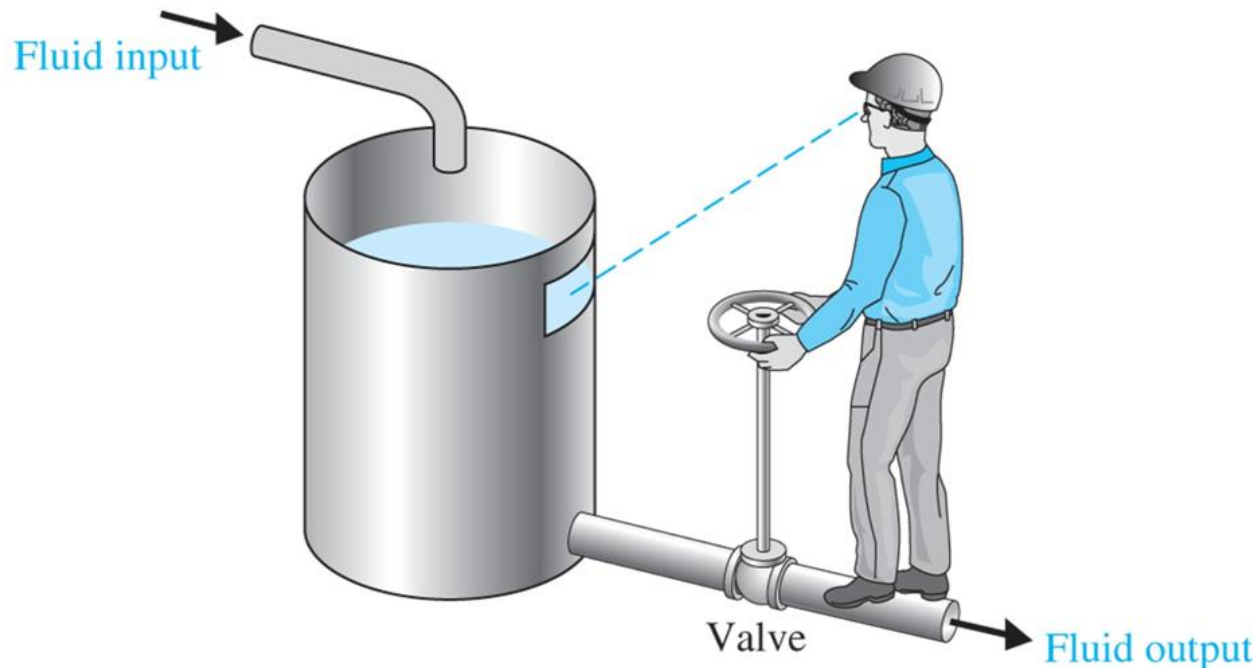
- Acionamentos automático de portas, elevadores, máquinas, etc.
- Controle de variáveis de processo na indústria: nível, vazão, pressão e temperatura.
- Controle de iluminação e temperatura de ambientes
- Controle de semáforos
- Controle de posição, velocidade e aceleração
- Satélites de comunicação
- Acionamento de foguetes



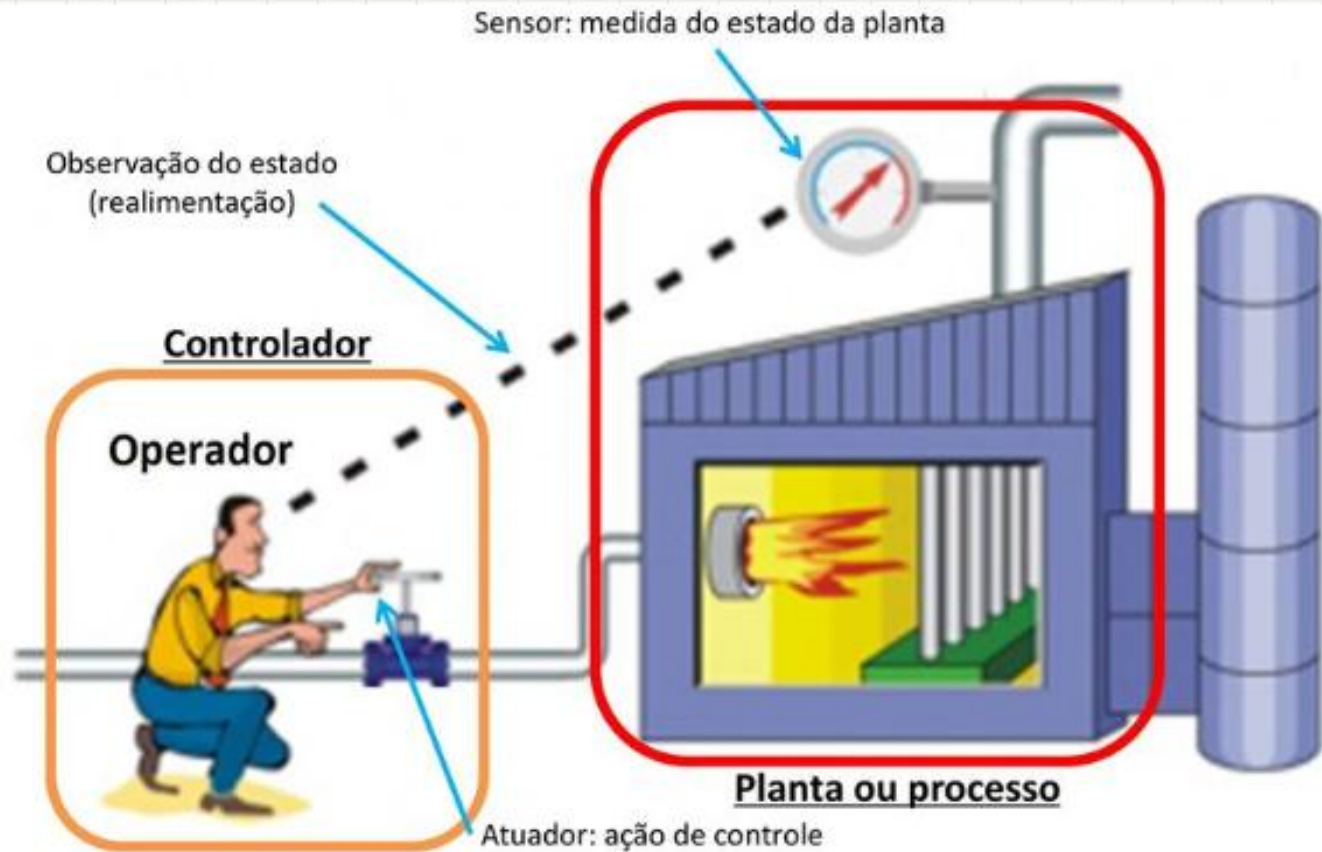
# Controle Manual x Automático

Controle Manual: quando existe a participação humana.

Ex: temperatura da água (chuveiro), abertura de portas, velocidade de uma bicicleta, temperatura de forno (convencional), etc.



# Controle Manual x Automático



O operador observa o estado da planta (temperatura da caldeira) e atua na válvula liberando mais ou menos calor, para fazer com que a temperatura permaneça dentro de um patamar desejado.

# Controle Manual x Automático

Controle Automático: o sistema funciona de forma autônoma sem necessidade de intervenção humana.

Ex: abertura automática de portas (sensor de presença), controle de temperatura de ambientes (ar condicionado), temperatura de forno industrial, etc.

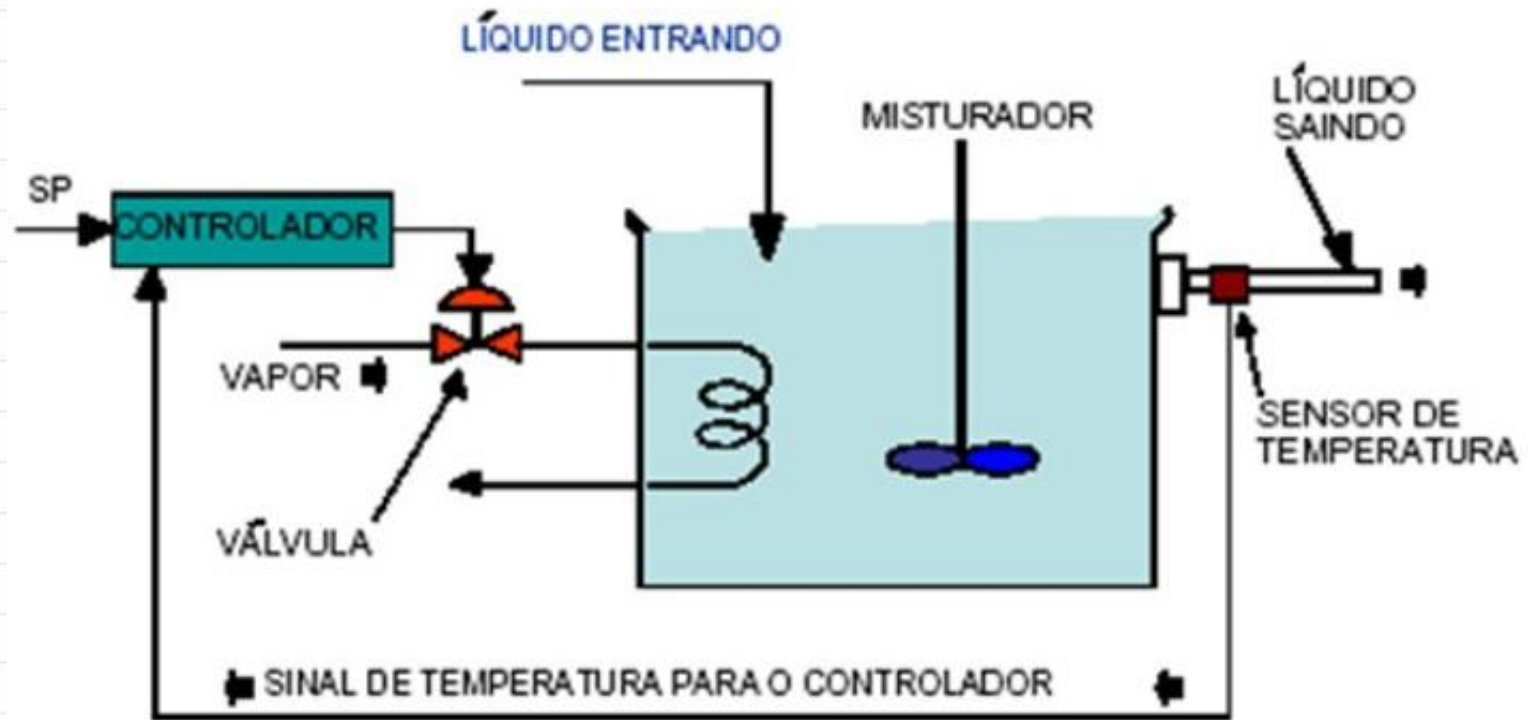


# Controle Manual x Automático



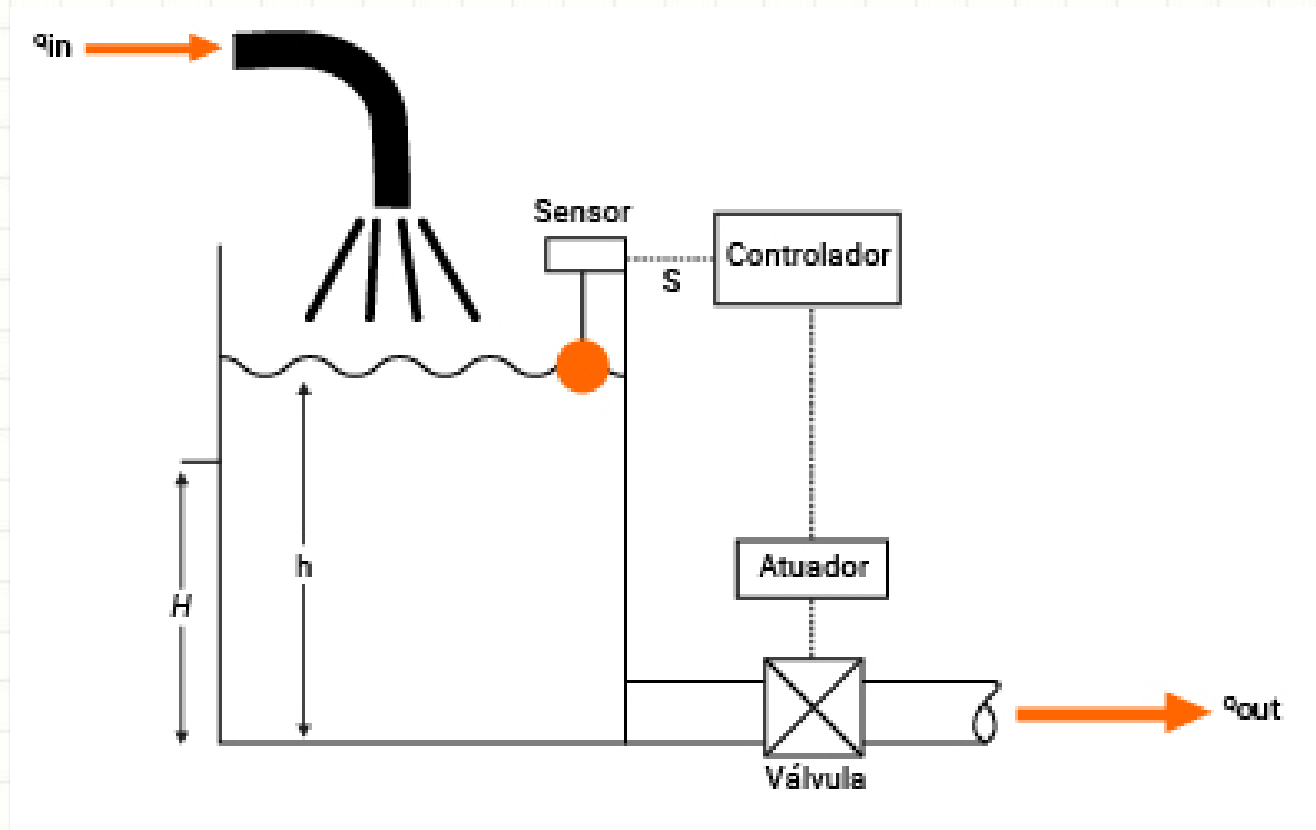
Ex: Abertura automática de porta

# Controle Manual x Automático



Ex: controle de temperatura

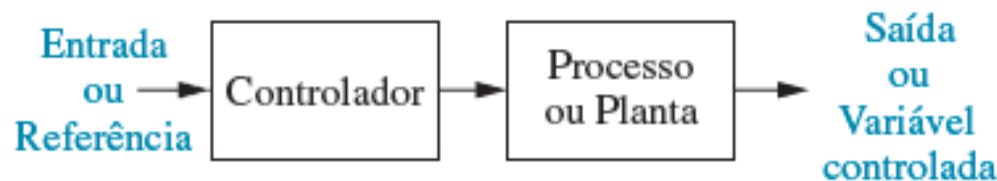
# Controle Manual x Automático



Ex: controle de nível

# Malha Aberta x Malha Fechada

Controle em Malha Aberta: a ação de controle não leva em consideração o valor da saída. Aplica-se um sinal de controle pré-determinado esperando-se obter a saída desejada.



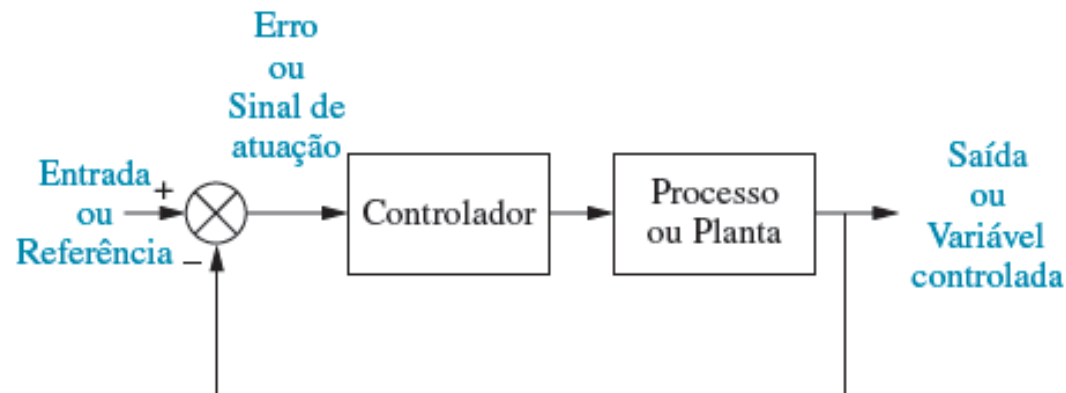
Exemplos: máquina de lavar roupa, sanduicheira, temperatura do forno, velocidade de um veículo (sem velocímetro).

Vantagens: simples e barato

Desvantagens: imprecisão, não adaptação às perturbações, dependência do julgamento humano, etc.

# Malha Aberta x Malha Fechada

Controle em Malha Fechada (ou realimentado): a variável de saída é medida e comparada ao valor desejado (setpoint ou referência). A ação de controle é executada com base na diferença entre o valor desejado e o valor medido.



Exemplos: velocidade de um veículo com velocímetro (manual ou automático), temperatura da água do chuveiro (manual), temperatura de forno industrial, etc.



# Controle em Malha Fechada

Em geral, a utilização da realimentação (malha fechada) permite:

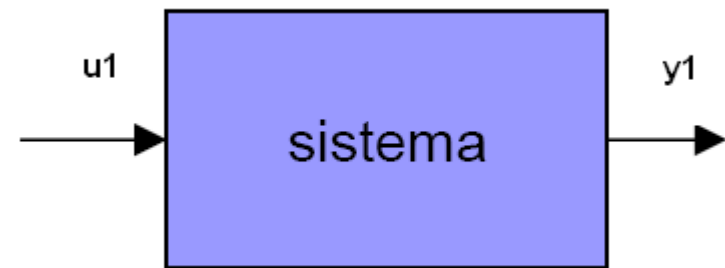
- Aumentar a precisão do sistema;
- Garantir estabilidade;
- Atenuar e/ou rejeitar o efeito de perturbações;
- Diminuir a sensibilidade do comportamento do sistema a variações de parâmetros;

# Classificação de Sistemas

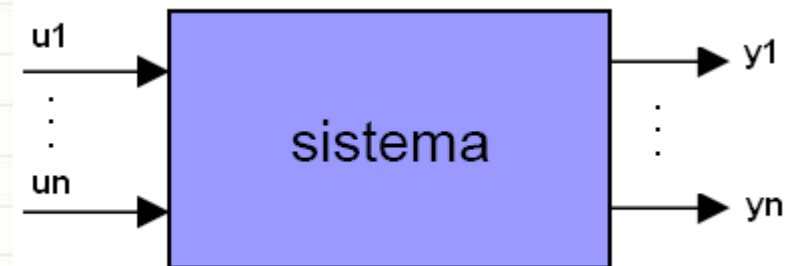
Os sistemas podem ser classificados em relação a algumas características.

## Quantidade de Entradas e Saídas

Monovariável ou SISO  
(Single-Input Single-Output)



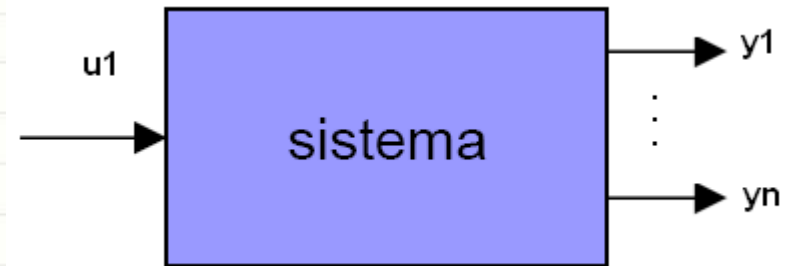
Multivariável ou MIMO  
(Multiple Input Multiple Output)



# Classificação de Sistemas

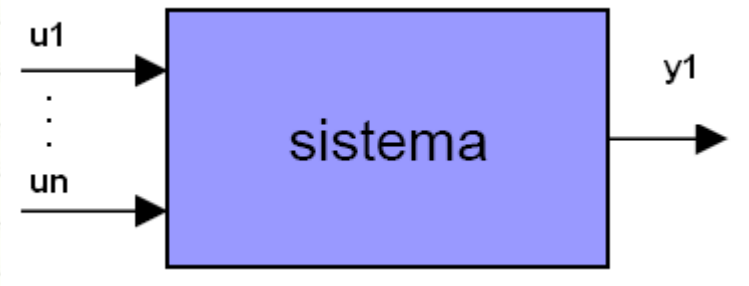
SIMO

(Single-Input Multiple-Output)



MISO

(Multiple-Input Siso-Output)



# Classificação de Sistemas

## Sistemas Lineares ou Não lineares

Um sistema é linear se satisfaz o princípio da superposição, ou seja, a saída de um sistema excitado pela soma de diversas entradas é igual à soma das saídas devido a cada uma das entradas.

### Princípio da Superposição

Definido por duas propriedades: aditividade e homogeneidade.

Um sistema é linear se atende simultaneamente as duas propriedades.

# Classificação de Sistemas

Seja um sistema descrito por

$$x_n(t) \rightarrow y_n(t) \quad t \geq t_0$$

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t) \quad t \geq t_0 \quad (\text{aditividade})$$

$$kx(t) \rightarrow ky(t) \quad t \geq t_0 \quad (\text{homogeneidade})$$

Este será linear se

$$k_1x_1(t) + k_2x_2(t) \rightarrow k_1y_1(t) + k_2y_2(t)$$



# Classificação de Sistemas

Todo sistema que não satisfaz o princípio da superposição é dito **não linear**.

Na natureza a maioria dos sistemas são não lineares. Porém, estes podem ser aproximados por sistemas lineares (linearização em torno de um ponto de equilíbrio).

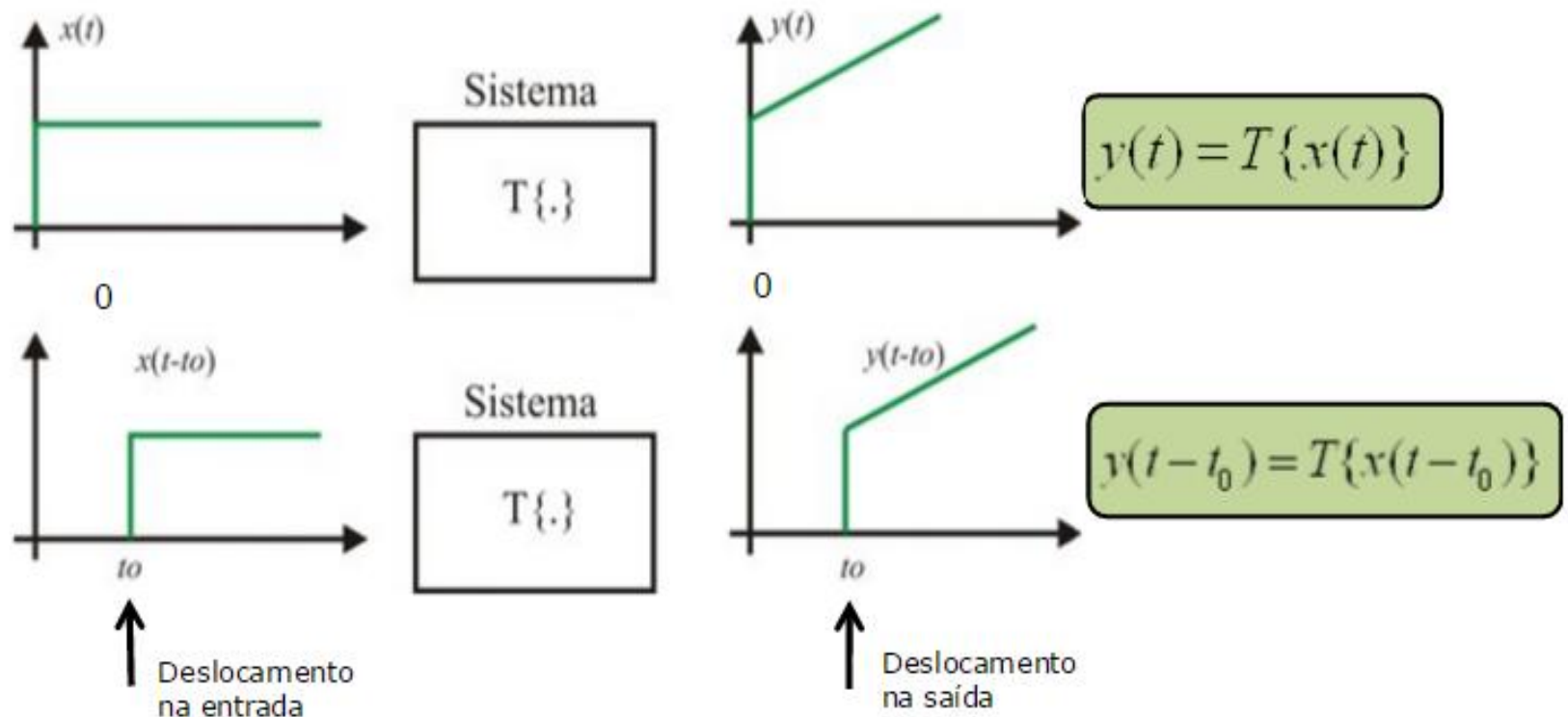
# Classificação de Sistemas

## Sistemas Variantes ou Invariantes no Tempo

- **Sistemas Invariantes no Tempo:** são aqueles cujos parâmetros não variam ao longo do tempo, por isto pode ser chamados de sistemas de parâmetros constantes.  
Neste caso, a saída é a mesma se aplicado um atraso na entrada ou na saída do sistema.
- **Sistemas Variantes no Tempo:** os parâmetros descritores do sistema são variantes no tempo.

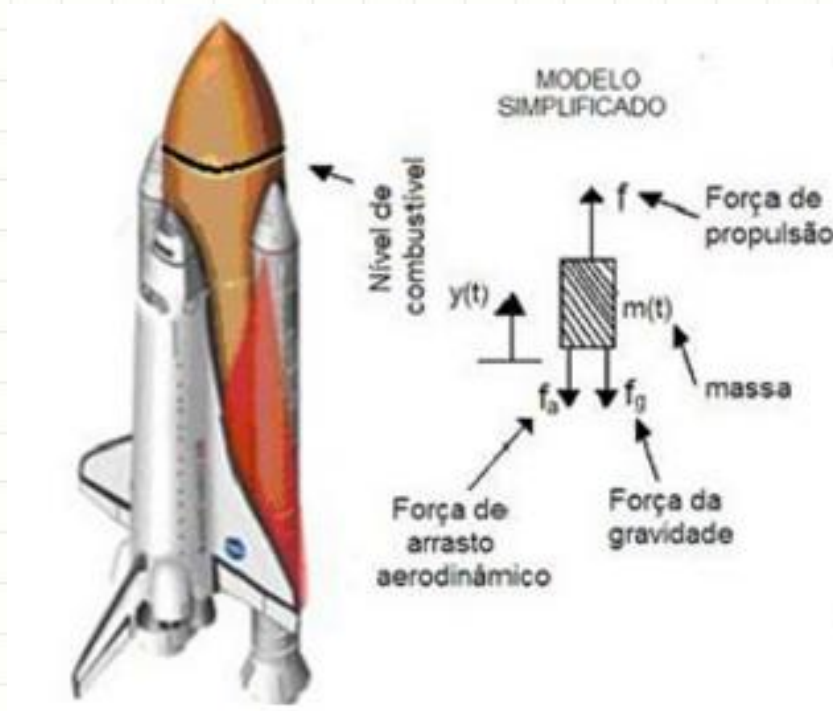
# Classificação de Sistemas

## Ex: Sistema Invariante no Tempo



# Classificação de Sistemas

## Ex: Sistema Variante no Tempo



Neste caso, a força resultante dependerá da massa que é variante no tempo.

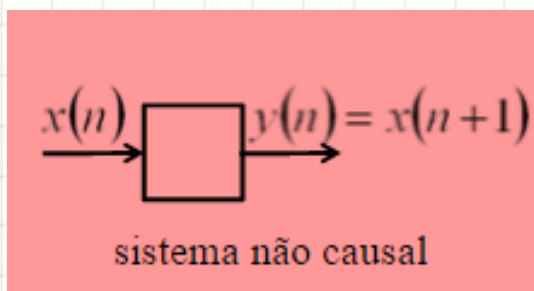
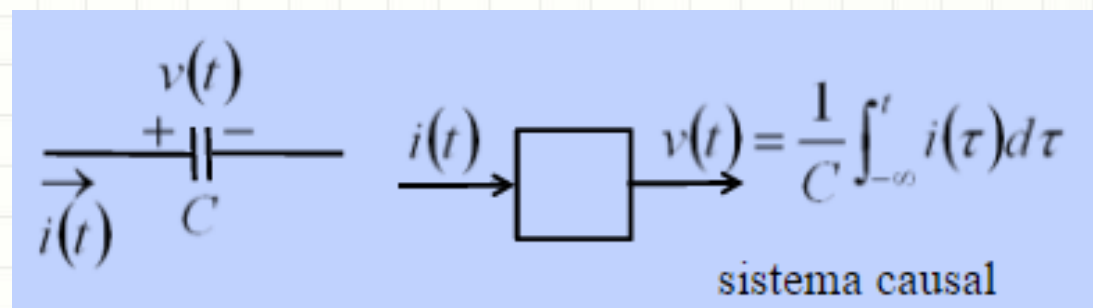
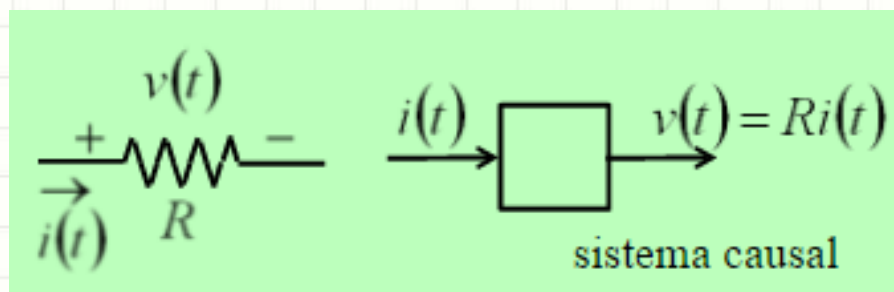
# Classificação de Sistemas

## Sistemas Causais e Não-Causais

- **Sistema Causal:** Um sistema é causal se a saída em algum instante  $t_0$  depende apenas da entrada para o tempo anterior a  $t_0$ . Logo, a saída depende apenas dos valores de entrada presentes e passados. Um sistema causal é dito não-antecipativo.
- **Sistema Não-Causal:** É um sistema que viola a condição de causalidade. Um sistema não-causal é dito antecipativo.



# Classificação de Sistemas



# Classificação de Sistemas

## Sistemas Contínuos ou Discretos

- **Sistema Contínuo no Tempo:** É aquele cujos sinais de entrada e saída são contínuos no tempo (definidos ou especificados para um intervalo contínuo de tempo).
- **Sistema Discreto no Tempo:** É aquele cujos sinais de entrada e saída são discretos no tempo (definidos ou especificados para instantes discretos de tempo).

# Classificação de Sistemas

## Sistemas Estáveis ou Instáveis

A **Estabilidade** pode ser definida como interna ou externa:

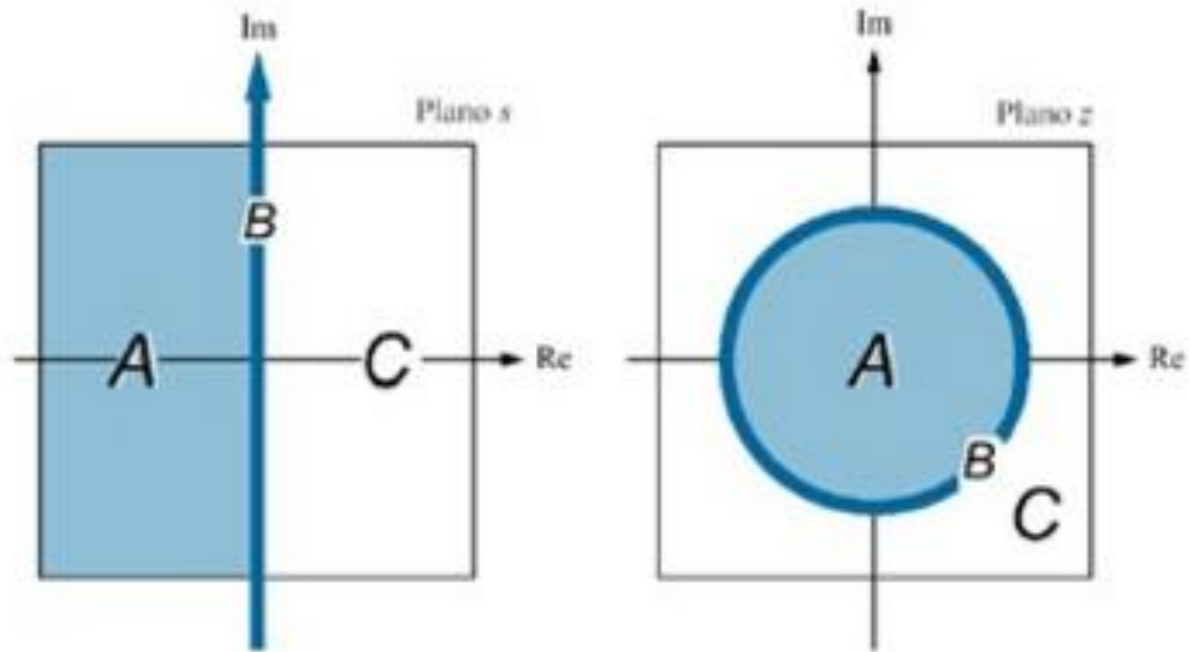
- Estabilidade Externa (BIBO): Se toda entrada limitada no sistema resulta em uma saída também limitada.
- Estabilidade Interna: Relacionada a variáveis internas ao sistema que devem possuir valores limitados e convergentes.

Um sistema é dito **instável** se a condição de estabilidade não for atendida.

# Estabilidade de Sistemas

## Função de Transferência

Um sistema é estável se e somente se os polos de sua F.T.M.F. estão no SPE no caso contínuo ou dentro do círculo unitário no caso discreto.



# Estabilidade de Sistemas

## Equações de Estado

Um sistema é **assintoticamente estável** se e somente se todos os autovalores da matriz de transição de estados (matriz  $A$ ) têm parte real negativa.

Um sistema é **marginalmente estável** se e somente se todos os autovalores de  $A$  têm parte real igual a zero ou negativa e aqueles que têm parte real igual a zero são raízes de multiplicidade 1 do polinômio mínimo de  $A$ .



# Modelagem de Sistemas

## Domínio do Tempo

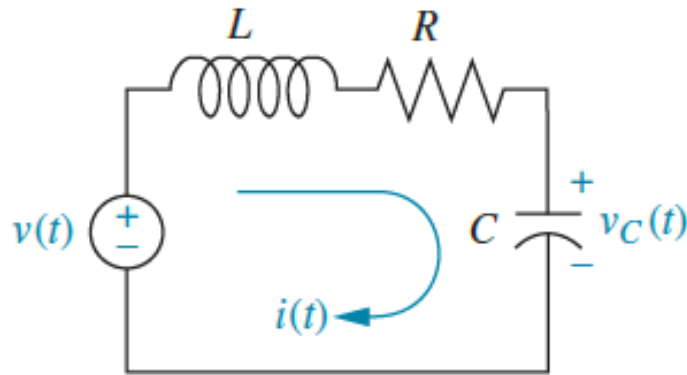
Representação de estados: uso de equações diferenciais (tempo contínuo) ou equações à diferenças (tempo discreto)

## Domínio da Frequência

Função de Transferência: uso de transformadas de Laplace (tempo contínuo) ou transformada Z (tempo discreto)

# Modelagem de Sistemas

## Representação de estados



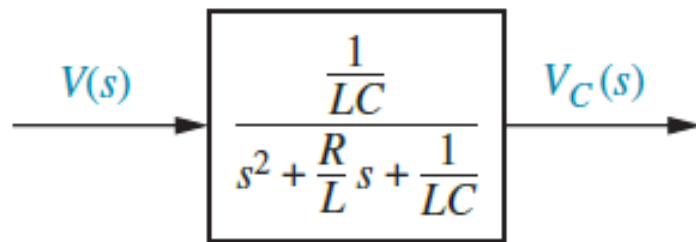
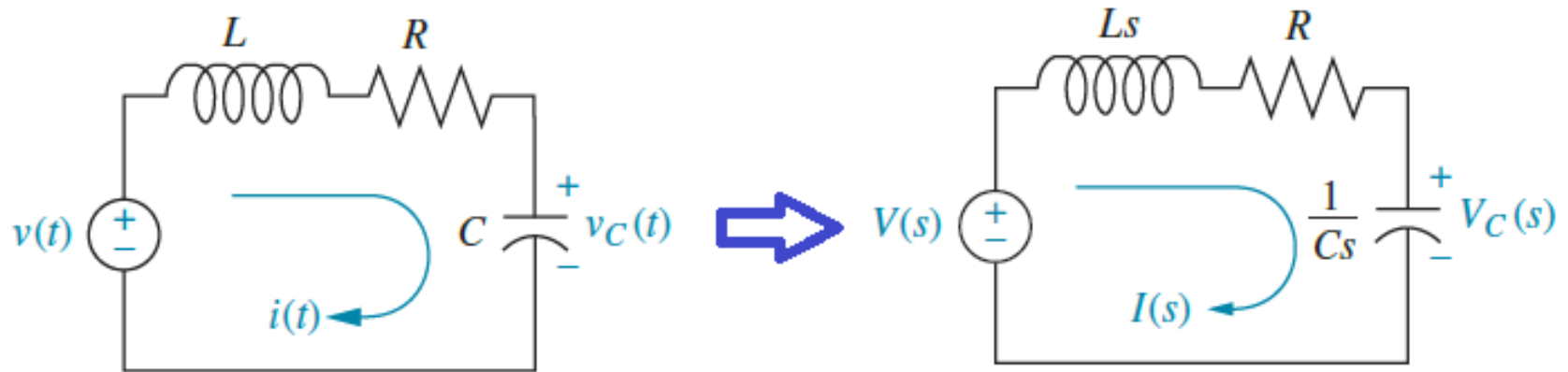
$$\begin{aligned} u(t) &= v(t) & x_1(t) &= i_c(t) \\ y(t) &= v_c(t) & x_2(t) &= v_c(t) \end{aligned}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -R/L & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

# Modelagem de Sistemas

## Função de transferência



$$G(s) = \frac{V(s)}{V_C(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

# Sistemas em Estudo

No curso serão considerados sistemas:

- Monovariáveis
- Lineares
- Invariantes no Tempo
- Causais
- Contínuos e Discretos

Serão considerados, na maioria dos casos, sistemas representados através de uma função de transferência conhecida.

# Sugestões de Leitura

**Engenharia de Controle Moderno – K. Ogata** (5ª Ed.)

Capítulo 1 – Introdução aos Sistemas de Controle

Itens 1.1 a 1.3

**Sistemas de Controle Modernos – R. Dorf & R. Bishop** (8ª Ed.)

Capítulo 1 – Introdução aos Sistemas de Controle

Itens 1.1 a 1.5

**Sistemas de Controle para Engenharia – G. Franklin** (6ª Ed.)

Capítulo 1 – Visão Geral e um Breve Histórico da Teoria de Controle Realimentado

Itens 1.1 a 1.3